TOMMASO MACCACARO • CLAUDIO M. TARTARI

# HISTORIA DEL DÓNDE

## EN BUSCA DE LOS CONFINES DEL MUNDO

SIRUELA BIBLIOTECA DE ENSAYO

# HISTORIA DEL DÓNDE

## EN BUSCA DE LOS CONFINES DEL MUNDO

TOMMASO MACCACARO, CLAUDIO M. TARTARI

Tommaso Maccacaro
y Claudio M. Tartari

# Historia del dónde

## En busca de los confines del mundo

Traducción del italiano
de Mercedes Corral

Siruela

Biblioteca de Ensayo 102 (Serie Mayor)

Edición en formato digital: marzo de 2019

Título original: *Storia del dove. Alla ricerca dei confini del mondo*
En cubierta: Bartolomé Anglico, *Livre de la propriété des choses*.
París, Bibliothèque Nationale (Ms. Fr. 9140).
Diseño gráfico: Ediciones Siruela
© 2017 Bollati Boringhieri editore, Torino
© De la traducción, Mercedes Corral
© Ediciones Siruela, S. A., 2019

Todos los derechos reservados. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, *www.cedro.org*) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

Ediciones Siruela, S. A.
c/ Almagro 25, ppal. dcha.
www.siruela.com

ISBN: 978-84-17624-89-7

Conversión a formato digital: María Belloso

# A MODO DE INTRODUCCIÓN

*Ve adonde puedas,*
*mira donde no veas,*
*escucha donde nada resuene.*
*Encontrarás algo.*

JOHANNES SCHEFFLER[1]

*En cada siglo los seres humanos*
*han creído comprender*
*definitivamente el universo y, en*
*cada siglo, se han dado cuenta*
*de que se habían equivocado.*

ISAAC ASIMOV

Si en lo que respecta al tiempo se ha hecho proverbial la respuesta de san Agustín («Mientras no me preguntes qué es, lo sé; si me lo preguntas, no sé responder»), en lo que respecta al espacio, la reflexión humana no ha encontrado las mismas perplejidades en la historia del pensamiento, al menos hasta la elaboración del concepto espacio-tiempo de la teoría de la relatividad de Einstein, con sus posibles deformaciones y eventual cuantización en longitudes cercanas a la longitud de Planck. El espacio, en su dimensión macroscópica y limitación euclidiana, parece connatural a la misma anatomía del cuerpo humano; podemos percibir de forma inmediata hasta dónde llegan nuestros sentidos, hasta dónde se extienden nuestras extremidades al asir algo o al movernos, y hasta dónde alcanza nuestra mirada. Por otra parte, durante miles de años nuestros antepasados se desplazaron por la múltiple morfología del planeta; cruzaron montes y océanos ampliando el alcance de su vista; dirigieron la mirada al cielo, o sea, a un espacio que, pese a no ofrecer una utilidad inmediata, para ellos, estaba cada vez más relacionado

con el espacio terrestre donde se consume la vida humana.

El objetivo de las siguientes páginas es precisamente esbozar el recorrido del pensamiento humano en lo referente a la percepción del entorno que nos rodea, desarrollando la siguiente idea fundamental: que repetida y sistemáticamente, la medición del espacio, es decir, del «mundo», nos ha ido revelando una realidad cada vez más grande y compleja de lo que pensábamos, y nos ha ido mostrando que los confines estaban más lejos, que había algo más allá. Ha sido un poco como explorar una vivienda enorme y descubrir por azar una puerta oculta en la tapicería; al abrirla, descubrimos una nueva ala de la vivienda antes desconocida. Después encontramos las escaleras, comprendemos que hay pisos superiores e inferiores inesperados y, por último, al llegar a una ventana, vemos otros edificios alrededor cuya existencia no imaginábamos. Y así sucesivamente.

Fueron necesarios siglos y milenios. Los hombres caminaron y navegaron ocupando todo el planeta; pero no recordaban los recorridos, no sabían de dónde habían venido ni adónde habían llegado. Para cada generación el espacio terrestre solo era lo habitado en su época. Se recorrieron varias veces las mismas rutas, se hollaron los mismos caminos y se descubrieron las mismas tierras, pero pronto se olvidaron. Las primeras señales de una reflexión humana sobre las distancias, la forma del territorio, la conciencia del «dónde» datan de hace apenas unos diez mil años. Pueblos alejados y que actualmente no se conocen entre sí vivieron bajo el mismo cielo e imaginaron diferentes cosas acerca de este; después, lenta, esporádicamente, la percepción del espacio —tanto el habitado como el remoto, tanto el terrestre como el celeste— se transformó en conciencia. La investigación del espacio se convirtió en «exploración» para el hombre, que empezó a desplazarse por el planeta y a observar todo cuanto se movía en el cielo. Solo desde hace unas decenas de siglos esa exploración se convirtió en «geografía» en lo relativo a la tierra y en «cosmología» en lo tocante al cielo. Las fantasías se transformaron en teorías, que, en ocasiones, se convirtieron a su vez en teoremas y sistemas.

Solo hacia el final de la Edad Media los portugueses se adentraron en el Atlántico, pero las cartas náuticas árabes que seguían utilizando sugerían un camino a las Indias dirigiéndose hacia levante. Los conocimientos geográficos acumulados en Constantinopla llegaron a Toscana a mediados del siglo XV; allí fueron provechosos para aquellos matemáticos que presumían de poseer un planisferio útil para navegar hacia poniente, pero que habían olvidado los antiguos cálculos de Eratóstenes, los cuales se habían aproximado mucho al radio terrestre real.

Después vino la empresa atlántica y ¡realmente había un Nuevo Mundo! En una feliz conjunción de esplendor económico, conocimiento y técnica, la Europa del siglo XVI dio un gran paso en la percepción consciente del espacio, tanto del de nuestro planeta, que se iba redefiniendo bajo los ojos de los navegantes, como del espacio del cielo, que había que reconsiderar y reestructurar. Lo harían los astrónomos. Durante el siglo siguiente, en solo veinte años —de 1639 a 1659— el resultado de la medición de la distancia al Sol casi se duplicó, pasando de los 14.000 radios terrestres de Horrocks a los 24.000 de Huygens, medición esta muy cercana a la aceptada en la actualidad. La distancia de las estrellas resultó mucho más difícil de medir. Una vez adoptado el sistema heliocéntrico, no se entendía que no se consiguiera observar el desplazamiento paraláctico. ¿A qué distancia se encontraban las estrellas entonces? Para responder a esta pregunta habría que esperar a mediados del siglo XIX, cuando por fin, después de arduos esfuerzos, se consiguió construir instrumentos astronómicos lo suficientemente precisos como para medir diferencias de posición del orden de la fracción del segundo de arco. Esto le permitió a Bessel registrar con éxito el primer paralaje estelar, obteniendo para la estrella 61 Cygni la distancia de 3 pársecs aproximadamente (10 años luz). Mientras tanto, a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XX, el sistema solar se amplió con el descubrimiento de Urano y, después, de Neptuno y Plutón. A principios del siglo pasado se sabía que el universo no se limitaba a nuestra galaxia y que muchas de las nebulosas que se veían, a una distancia de millones de años luz, eran galaxias semejantes a la nuestra. En pocos años se pasó de un universo compuesto por los centenares de miles de millones de estrellas de la Vía Láctea a un universo constituido por cientos de miles de millones de galaxias, cada una de ellas compuesta por cientos de miles de millones de estrellas. Y poco después se tuvo que abandonar la idea de un universo estático e inmutable a favor de un universo en continua expansión. Desde hace tan solo unas décadas hay quienes se plantean la posibilidad de que el universo no sea único, sino uno entre muchos. El proceso de investigación de los confines del mundo —al principio lento, a veces continuo y otras veces con saltos considerables— se ha ido acelerando, pero todavía no ha concluido.

El relato que sigue es inicialmente cronológico, abarcando desde la protohistoria a la Edad Moderna, y trata de dar cuenta de las intuiciones y los límites con los que se encontraron los pensadores antiguos, límites instrumentales, pero con frecuencia también ideológicos, dictados unas veces por quienes detentaban el poder y otras por el «temor» que la investigación comportaba. *Non plus ultra*

era la admonición grabada en las columnas de Hércules, símbolo geográfico del límite posible para la exploración terrestre. Una vez traspasado este, a lo largo del siglo XVI, parecen resquebrajarse las certezas y prohibiciones incluso en la forma de replantearse el espacio celeste.

Después, con el nacimiento de la astronomía moderna y el desarrollo tecnológico que la impulsó, el relato cambia de registro y la historia se convierte en crónica. Son tantos los conocimientos y las posibilidades instrumentales que se han sucedido en los siglos más próximos a la época actual, con los vertiginosos descubrimientos e impresionantes escenarios de los últimos cien años, que se hace necesaria una mayor cantidad de información científica especializada y un paso diferente para un relato que no queremos articular como un mero análisis cronológico.

Conforme nos vamos acercando a nuestros días, el ritmo de crecimiento de los conocimientos se vuelve frenético y conduce a una paradoja. ¿Qué es lo que aumenta con más rapidez? ¿El conocimiento o la conciencia de lo desconocido? Las cosas nuevas que vamos descubriendo y que debemos estudiar y comprender parecen cuantitativamente más que las que ya hemos comprendido. Podemos imaginarnos el conocimiento como una fracción matemática (la relación entre lo que ya sabemos y lo que sabemos que existe pero que todavía debemos comprender). Nuestra labor de investigación de los «confines» y de los contenidos implica que aumente el numerador (lo que sabemos), pero también que aumente sobre todo el denominador (lo que sabemos que no sabemos y que debemos comprender). Así pues, la fracción se vuelve cada vez más pequeña. Sin ninguna presunción, como las que alimentaban los pensadores positivistas, podemos en cualquier caso seguir investigando, con la estimulante certeza de que, mientras haya una mente pensante, la conciencia de la ignorancia no dejará de aumentar. Esta es la paradoja del conocimiento.

# 1

## PROTOHISTORIA

La intuición kantiana de que el espacio solo era una categoría de nuestro pensamiento abrumó a los estudiosos del siglo XIX. A lo largo de ese periodo las ciencias naturales hicieron grandes progresos, invadiendo campos que antes parecían exclusivos de los filósofos. Así, por ejemplo, el comportamiento humano, la pulsión a actuar hacia el «bien» o el «mal», la conciencia —sin que los moralistas dejaran de hablar de todo ello— se convirtieron cada vez más en materia de investigación de los frenólogos y después de los anatomoneurólogos.

A principios del siglo pasado, Brodmann fue capaz de esbozar un mapa de las áreas cerebrales que controlan las diferentes funciones. Sus seguidores —en especial Constantin von Economo—, comparando el cerebro actual de nuestra especie con el de otros animales superiores y con los fósiles craneales que los descubrimientos paleontológicos aportaban con cada vez mayor frecuencia, pudieron aventurar una suerte de filogénesis de determinadas áreas conductuales o perceptivas. Aunque hoy seguimos estando muy lejos de conocer las diferentes funciones del conjunto de la masa cerebral y parece incluso que puede haber un intercambio de funciones de forma vicaria entre las distintas áreas, es cierto que «la vía dorsal interviene en la elaboración de los aspectos visuales necesarios para localizar [no divisar] un objeto en el espacio»[2].

Pues bien, esta parece ser el área craneal que a lo largo de millones de años se modificó hacia el modelo craneal de aquel homínido que hace 3,6 millones de años dejó sus huellas junto a las de su cachorro en Tanzania: huellas que indican una clara postura erecta y unos andares perfectamente coordinados.

Estos homínidos —y cada vez menos sus descendientes— no poseían el olfato de las ratas ni la vista de las rapaces y de los felinos, ni tampoco la sintonía con el campo magnético que guía a las aves y animales acuáticos migratorios. Los escasos recursos para moverse en el «espacio vital» (para conseguir comida y formas de huida) encontraba en esta postura erecta —alcanzada probablemente por

casualidad y en sí misma no inmediatamente funcional— un recurso para la supervivencia. La mirada se agudiza y se mueve linealmente de derecha a izquierda, los brazos se expanden lateralmente, el cuerpo va de la cabeza, bien erguida, a los pies, que se apoyan sólidamente sobre el terreno. Retomemos las conclusiones de los neurocientíficos parmesanos Ferrari y Rozzi: «Si bien nuestra percepción del espacio es unitaria, en realidad en nuestro cerebro acontecen distintas elaboraciones en paralelo que codifican el espacio en diferentes sectores que están en relación con el cuerpo. También en este caso la dimensión corporal es el centro de gravedad de la percepción y de la construcción del espacio corporal».

Dicho de otra manera, cuando al *Homo erectus* empezó a resultarle útil la «codificación» del eje visual (delante-detrás) y del eje de los brazos extendidos (alto-bajo), podemos afirmar que se estaba dotando de un instrumento formidable: la conciencia de que el mundo con el que interactuaba tenía tres dimensiones, y que estas ordenaban la realidad perceptible. En suma: la posibilidad de asir el fruto antes que los demás y salir corriendo en la dirección más conveniente.

Sin embargo, la competición era dura. Los homínidos de los que hablamos, cubriendo un arco cronológico de varios cientos de miles de años, no tenían los sentidos ni los sensores que permiten a otras especies moverse en hábitats de grandes dimensiones. Mientras el cerebro se iba modificando para albergar mayores áreas útiles a la coordinación de las extremidades superiores, nuestros antepasados tenían que organizar un espacio vital que, por lo exiguas que fueron las poblaciones de *Homo habilis*, nunca era suficiente ni seguro. Quien no domina el territorio, lo abandona y huye, si no quiere convertirse en presa.

Pero ¿adónde? Y aquí utilizamos un término probablemente anacrónico para las capacidades de abstracción del cerebro de nuestros antepasados: «adónde»…

Para concebir un lugar que no fuera el *hic et nunc*, sino «en otra parte», eran necesarios signos muy perceptibles que se quedaran grabados en la memoria colectiva por estar relacionados con la satisfacción de las necesidades primarias (ese curso de agua, ese lago lleno de presas, aquel boscaje fértil, aquella cueva apta para resguardarse…), puntos de referencia que constituyen la base de una primitiva cartografía del territorio, es decir, lugares no solo identificables libremente, sino «nombrables», descriptibles, transmisibles. El «espacio vital» compartido *in situ* empieza así a hacerse más grande, posiblemente conocido o experimentado por un pionero. Estos datos, conseguidos de forma accidental y quizá inconexos entre sí, son los que permitirán después formas de migración en cierto sentido planeadas; migraciones, no huidas.

La mayoría de los grupos humanos que se movían aleatoriamente o solo por imitación de otras especies más dotadas probablemente fracasaron. En cambio, los que exploraban el territorio circundante tratando de elaborar un mapa incluso conceptual tuvieron mayores probabilidades de sobrevivir durante los desplazamientos. En estas fases de movimiento en busca de nuevos hábitats, era fundamental la posibilidad de ampliar el radio visual de observación, o sea, de subir a los montes y contemplar horizontes más vastos. Un valle, un curso de agua, el surco de antiguos cauces o ríos fósiles entre los riscos podían ser la ruta más fácil para desplazarse, pero para hacerse una idea de la dirección debían subir bien alto. Los flujos migratorios procedentes de África parecen recorrer formaciones geográficas dotadas de estos elementos. Las variables, en generaciones y generaciones de desplazamientos, fueron obviamente múltiples. Cambios climáticos, fenómenos sísmicos, retroceso o expansión de las aguas debieron de comportar numerosas opciones e impedimentos. A todo lo que podía observar desde las alturas o desde las cimas que iba alcanzando poco a poco, el *Homo sapiens* del Paleolítico inferior (hace menos de 500.000 años) empezó así a añadir otros datos espaciales, datos relacionados justamente con su ya mencionada tridimensionalidad física. Si el paisaje terrestre podía mostrarse cambiante e incierto, el «paisaje» celeste mostraba sin embargo continuidad, periodicidad y puntos de referencia claros: lo de arriba y lo de abajo son observados con ojos diferentes y valorados de forma distinta. El territorio donde este hombre se mueve, su hábitat, es múltiple y hostil, mientras que el cielo es seguro y tranquilizador. Así, las poblaciones de las cadenas montañosas saharianas y de los macizos centrales de Australia —muy distantes entre sí, pero con situaciones climáticas, morfológicas y latitudinarias análogas— puede que fueran las primeras en contemplar los movimientos astrales con mayor claridad que otras, que podían disfrutar del cielo despejado con menos frecuencia, vivían en hondonadas o tenían un ritmo circadiano estacionalmente cambiante, no basado en el equilibrio constante entre la noche y el día.

En ese contexto, por lo demás totalmente conjetural, no se puede ciertamente hablar de observación astronómica; se trataba simplemente de observar y de darse cuenta de que los datos obtenidos podían ser útiles para la supervivencia —las noches de plenilunio para la caza o el desplazamiento, el calor solar creciente y decreciente a lo largo del día, los momentos adecuados para acechar a las presas, cuando les llegaba la luz por detrás y no de frente, etc.—. Sin embargo, la constancia de la dirección desde la cual los astros próximos a nosotros surgen y declinan ofrecía puntos de posición seguros (el «dónde») que permitían progresar en lo que llamaremos orientación, o sea, en una conciencia de las direcciones en las que

moverse dentro del territorio habitado, en una conciencia de un fenómeno que parecía constante y compartido.

Las sepulturas del Mesolítico en los montes de Siria (culturas kebariense y natufiense) no muestran rastros de orientación; los movimientos celestes no se relacionan todavía con lo que no está vivo ni tampoco con una representación espiritual del cielo. Pero poco después, al final de la última gran glaciación y del clima seco y límpido, en los Pirineos (cultura aziliense) se fabricaron numerosas piedras planas trabajadas con buril que parecen describir un mapa celeste rudimentario pero reconocible. Eso sucede hace 15.000 años aproximadamente, y las siguientes sepulturas (pasados tres o cuatro mil años), ya atribuibles a la primera fase del Neolítico mediterráneo, revelan enterramientos con una orientación rigurosa, normalmente con la cabeza del difunto colocada hacia la salida del sol. En esta era se sitúa el comienzo de las culturas sedentarias de los primeros agricultores. La observación del movimiento perceptible de los astros, de los ciclos lunares, de la intensidad de la luz solar sirve para el cultivo de los vegetales comestibles. El espacio habitable en la tierra se relaciona con el «espacio celeste». Las sepulturas orientadas son interpretables, por tanto, como la señal de una primitiva idealización de la esfera celeste. Es la antesala de los cultos astrales de los milenios venideros. En cualquier caso, la mirada humana ya es capaz de conceptualizar el espacio visible que encuentra a su disposición. Dentro de poco, la conceptualización deberá ser también representable.

Hace ocho mil años aproximadamente empiezan a aparecer piedras monolíticas erigidas en vertical, primero en las islas del Pacífico asiático y después, de forma progresiva, en Siberia, los Urales, Europa y el Mediterráneo. Aunque la larga duración del fenómeno, más de cinco mil años, lleve a atribuir a estos objetos funciones con significados diversos, a juicio de los paleoantropólogos la constante debe buscarse en la simbología que pretendía establecer una conexión entre la tierra y el cielo. Es decir, entre el espacio del hombre y un espacio exterior no alcanzable ni controlable, pero del que se derivaban hechos de vital importancia (la luz, el calor, la lluvia, los rayos).

Otros restos arqueológicos del mismo periodo atestiguan la difusión de un culto de los objetos celestes ya consciente y quizá ritualizado. Las pinturas rupestres de la meseta de Tassili, en Argelia, así como las de Utah y las más recientes de Val Camonica, en Italia (Eneolítico), dan fe del predominio del culto solar. El Sol es evidentemente el astro más visible y el más necesario para la vida. Desde el cuarto milenio a. C. se encuentran documentados cultos solares desde el extremo norte de Europa hasta Egipto, con el probable

intento de medir el movimiento del Sol. Los primitivos menhires verticales evolucionan hacia los obeliscos egipcios y los círculos megalíticos, que se difundieron desde las islas británicas a las del Mediterráneo.

Pero los hombres no solo adoran y observan el Sol. En Mesopotamia, también hace cinco mil años aproximadamente, la observación de la Luna y de sus fases lleva a la elaboración de un calendario bastante preciso, algo plausible dada la cercanía y la visibilidad de nuestro satélite.

Más sorprendente es la correcta observación de Venus. Ishtar será para los pueblos mesopotámicos el astro por excelencia, palabra que deriva precisamente del nombre caldeo de este planeta. ¿Qué incidencia práctica podía tener para los seres humanos esa luz tan bella como una piedra preciosa, presente por la mañana y por la noche? No rige las estaciones como el Sol, ni la marea y los flujos como la Luna; sin embargo, se convierte en objeto de especulación y de veneración como deidad femenina desde la Edad del Bronce hasta nuestros días. Lucero del Alba es un epíteto del culto mariano.

Los sabios que en aquellos milenios de nuestra protohistoria, por limitarnos a las civilizaciones mediterráneas, siguieron observando el espacio y desarrollando conocimientos, tuvieron como continuadores a aquellos que, detentando tales conocimientos, podían ejercer un poder. Cuando los cultos astrales fueron ritualizados y formalizados por la casta de los sabios, el culto se convirtió en religión, los sabios se convirtieron en sacerdotes y el conocimiento adquirido se convirtió en dogma. No es casual que este proceso coincida históricamente con el nacimiento de las monarquías en todo el Creciente Fértil y más tarde en el Mediterráneo.

Si el Cielo con mayúscula es la morada de la divinidad, quien examina el cielo pone en tela de juicio a la misma divinidad. En suma, hay un «dónde» permitido y un «dónde» prohibido.

# 2

## HISTORIA ARCAICA

El origen de la mitología védica en el valle del Indo se remonta al quinto milenio a. C.; en ella aparecen tres divinidades arquetípicas: Indra, el rayo; Surya, el sol; y Varuna, el cielo. En la complicada trama mitológica posterior, antes del año 2400 a. C., se fue bosquejando una línea de pensamiento que jerarquizaba a las tres figuras en sentido espacial: de arriba vienen los rayos, pero más arriba está el sol, y más arriba todavía el cielo. Se intuye, como en las culturas semitas, una distancia diferente de los niveles superiores, una especie de profundidad lineal.

Un relato védico de esa misma época cuenta que Surya dio a los hombres la rueda, es decir, que la observación del disco solar en su diurno rotar condujo a la invención de un disco artificial que podía moverse sobre su circunferencia y girar sobre su eje. Más allá de otras numerosas simbologías (la rueda todavía destaca en la bandera de la India), la mitología grecolatina de ascendencia aria siempre representó al Sol como un carro en movimiento. Que el Sol no era un disco que rodaba, sino una esfera de gas en rotación diferencial (rota más rápidamente en el ecuador que en los polos) no se descubriría hasta la Edad Moderna, a raíz de las observaciones sistemáticas de las manchas solares, ya conocidas en la Antigüedad.

A la civilización del valle del Indo se atribuye además la primera aplicación de módulos espaciales regulados. Tanto Mohenjo-Daro, en Pakistán, como las demás ciudades que datan del tercer milenio a. C. revelan criterios urbanísticos que presuponen dos factores: una proyección centralizada y la adopción de unidades de medida prácticas y compartidas. Los criterios urbanísticos de estas ciudades tienen muy poco que ver con las simbologías celestes y parecen responder, en cambio, a necesidades funcionales contingentes, como son la salubridad del lugar, pendiente para el vierteaguas, orientación sur, etc. Sin embargo, los módulos de edificación son rigurosamente uniformes tanto en lo que respecta al volumen de los ladrillos y de los sillares como a las relaciones de cubicación de los locales, la anchura

de las vías transitables e incluso los cilindros de barro cocido para canalizar las aguas residuales. Parece, en suma, que el hombre sintió la necesidad de dotarse de unidades de medida empíricas para todo aquello que podía manipular. Las pequeñas medidas espaciales (el palmo, el pie y el paso) tenían como referencia justamente el cuerpo humano. Las distancias celestes —consideradas entonces con razón como inconmensurables— permanecían ajenas a esa necesidad humana. En cambio, las medias y largas distancias de la Tierra empezaron a plantear problemas de medición con la difusión del uso del carro. Si las milenarias caravanas de animales de tiro podían trasladarse por pistas o trazados cambiantes, el carro de ruedas requería caminos. Y la proyección y la puesta a punto de los caminos exigía cálculos y medidas lineales convencionales. La matemática aparece entonces en escena dentro de la historia de la percepción espacial, de la que ya no volverá a salir.

Sin embargo, la principal vía utilizada en las grandes civilizaciones de las cuencas fluviales (del Nilo al Ganges) siguió siendo durante milenios el agua. Para navegar por un río no se requerían distancias medidas convencionalmente, sino tan solo una somera descripción abstracta de los trayectos y de las distancias expresadas en medidas. La misma corriente del río señala la dirección, independientemente de los recodos y meandros que este tenga; su curso se encuentra señalado por puntos de referencia orográfica o morfológica, ya sean naturales o artificiales. En pocas palabras, esta navegación no se mueve en «grandes espacios», por lo que no necesita de la cartografía de forma inmediata. Otro problema muy diferente se les planteó, en un contexto geográfico muy distinto, a las poblaciones asiáticas y melanesias que en aquellos mismos milenios se hallaban asentadas en los archipiélagos de Oceanía. Allí las distancias sí que eran realmente grandes, escasos los puntos de referencia, e inexistentes o fugaces los trazados bajo la línea del horizonte, como la estela de la canoa… Fue, por lo tanto, a través de una atenta exploración del cielo estrellado, de las fases lunares y de las consiguientes mareas como aquellos navegantes se dotaron de mapas altamente abstractos que combinaban, con una trama de fibras, los cuatro puntos cardinales, las mareas periódicas y la dislocación de las islas en los nudos, destacados con conchitas o piedrecitas. Obviamente no disponemos de estos perfeccionados instrumentos náuticos, que son tan antiguos como las migraciones (IV-III milenio a. C.), y solo por inducción podemos pensar que se utilizaron en épocas tan remotas. Ciertamente las elaboraciones conceptuales del espacio marino de los navegantes de Oceanía fueron sustancialmente desconocidas para las otras elaboraciones conceptuales llevadas a cabo por culturas más cercanas a nosotros. Estas últimas tuvieron profundas consecuencias sobre la

forma de concebir el espacio propio de las civilizaciones mediterráneas. En cambio, las elaboraciones de los oceanonautas planteaban la necesidad del «dónde» a un nivel más alto.

Dos vistosos edificios monumentales definen las civilizaciones fluviales del llamado Creciente Fértil: el zigurat y las torres de Mesopotamia, y las pirámides egipcias. Casi contemporáneos (2500 a. C.), estos imponentes edificios respondían a concepciones y finalidades diversas. Los primeros fueron levantados como observatorios nocturnos del cielo estrellado, y eventuales altares sacrificiales o para actos litúrgicos, y permitieron en el segundo milenio a. C. definir el carácter cíclico de los fenómenos celestes calculando su repetición (el ciclo de saros). En cuanto a las pirámides —que según algunos están orientadas hacia estrellas fijas—, eran tumbas cuya cúspide dorada conectaba al divino difunto con la luz solar, con un valor simbólico, pero sin finalidades especulativas.

Egipto produjo también la primera estilización de las piedras verticales antes mencionadas (los obeliscos). Se trata de sólidos de cuatro caras, con una altura de muchos pies egipcios —el pie egipcio es una unidad de medida referida a una parte del cuerpo humano idealizada y convencional—. El hombre se apoya en los pies y se yergue con la cabeza hacia el cielo, lo mismo que el obelisco que sostiene en la cúspide el disco solar. En el Egipto del siglo XX a. C., la observación del movimiento de la sombra proyectada, conocida desde hacía milenios, se convierte en medición de esta variación lineal. Sin embargo, no se aplicó para medir los terrenos —es decir, no se convirtió, como creyeron los griegos, en «geo-metría»—, sino para intentar medir la Tierra y tal vez las distancias de esta a la Luna y al Sol. Este intento, conceptualmente correcto, se prolongó durante siglos, y en él participaron una élite de sabios que, sin embargo, carecía de procedimientos aritméticos; al no tener una consecuencia práctica inmediata, cayó con frecuencia en la especulación teológica.

El episodio más clamoroso fue el monoteísmo solar instaurado por el faraón Akenatón (siglo XIV a. C.). La nueva capital se denominó Ajetatón («Horizonte del Disco Solar»), y se edificó de forma orientada y con vías ortogonales; el calendario solar abolió el cómputo de las lunaciones —más perceptibles— y, sobre todo, el «Amado por Atón» situó al Dios Único Sol en el centro del universo. Esta herejía heliocéntrica fue considerada inaceptable no por motivos astronómicos, sino porque alteraba todo el ordenamiento jerárquico espacial y también el social, ya que la religión solar sostenía que el dios único «brillaba para los pobres y para los ricos». Sin embargo, es conjeturable que si este heliocentrismo ideológico se hubiera consolidado como religión de Estado se habrían desencadenado esfuerzos cognoscitivos encaminados a desarrollar una visión

heliocéntrica del movimiento de los cuerpos celestes próximos a nosotros. Lo que es indudable es que la propuesta de Akenatón conllevó una reacción de la casta sacerdotal, que asestó un duro golpe a cualquier voluntad especulativa hacia el heliocentrismo, por ser este demasiado democrático. Se formulaban así las primeras premisas para un uso ideológico del futuro sistema ptolemaico.

Casi al mismo tiempo que en Egipto, y pese a la falta de contacto entre ambas culturas, en China surgía otra visión del espacio. Los soberanos de la dinastía Shang (también conocida como dinastía Yin) establecieron una suerte de teocracia en la que T'ien —la bóveda celeste— es un *unicum* supremo e inescrutable. En el mundo de los hombres, en cambio, todo se ordena en torno a una visión cuadrada y ortogonal, basada en los cuatro puntos cardinales. En el centro se encuentra el palacio del emperador, rigurosamente cuadrado, y alrededor de él las murallas de la ciudadela cuadrada, y así sucesivamente en cuadrados concéntricos cada vez más abstractos a medida que el espacio terrestre, imaginado como plano, se va extendiendo. China se autodenomina «el País del Centro», en el cruce de las diagonales del mundo cuadrado. Esta mentalidad, que en el uso del carro se oponía ideológicamente al libre cabalgar de los nómadas de las estepas, articulaba el espacio en torno a los caminos que salían del núcleo del poder. Poder y espacio terrestre, controlable y posiblemente mensurable y contable. Los sabios sabían que el camino hacia el cielo es mucho más arduo y seguramente impracticable para los hombres. Es el Tao (el «camino» justamente). Siglos después, el gran ordenador social Confucio, con mucho sentido práctico, llegaría a afirmar: «No ruego al cielo ni me lamento de los hombres. Aprendo desde lo bajo y procedo hacia lo alto». Pero la realidad terrestre, cotidiana, acabó cristalizándose en una visión plana, casi bidimensional, indiferente al cielo y a su profundidad. Se advierte en esta visión un esfuerzo secular por las medidas precisas, por cuantificar, por numerar. Parafraseando el célebre título de Alexandre Koyré, para los chinos reflexionar sobre el espacio supuso avanzar «desde el mundo de lo aproximado al mundo de la precisión». Mundo, justamente, no universo; el mismo mundo con el que se toparon los jesuitas dos mil años después de Confucio.

En los últimos siglos de la Edad del Bronce (hasta el siglo X-IX a. C.) Mesopotamia y Persia son de nuevo los lugares en los que hubo más señales de cambio en la percepción y en el conocimiento del espacio sensible —no decimos «progreso», porque ello implicaría un juicio positivo—. Las depuradas habilidades calculatorias llevaron así a la elaboración de calendarios para uso de los soberanos, aunque, a fin de cuentas, ¿qué utilidad práctica podía provenir del esfuerzo de

los sabios por observar aquellas luces remotas? Lo siguiente es solo una hipótesis: si los magos no hubieran propuesto a los poderosos un uso instrumental de sus trabajos, la investigación, que requería imponentes y costosos edificios, se habría detenido. El hecho es que el conocimiento de los eclipses, de los ciclos astrales, de las estrellas fijas estaba ya muy avanzado cuando, al comienzo de la Edad del Hierro, se abre paso la idea utilitaria de la astromancia. Como ya se ha dicho, el culto astral estaba difundido y arraigado desde hacía milenios. Se trataba de divinidades benéficas y remotas, diferentes de los dioses de la biosfera, que eran mucho más temibles y exigían sacrificios. En su ser «superior», en cambio, los dioses del cielo (o el mismo cielo) eran relativamente indiferentes a las contingencias de la breve vida humana.

De ese modo, complementando la astrolatría con la astromancia —la creencia de que a través de la observación del cielo remoto se podían predecir las vicisitudes humanas—, el cielo se volvía cada vez más cercano. La mántica sustituyó la desconcertante lejanía intuida por los sabios por figuras imaginarias pero reconocibles para todo el mundo: las constelaciones.

Estrellas lejanísimas y de distancias desiguales entre sí, pero percibidas con distancias fijas entre ellas, fueron conectadas por líneas imaginarias como si yacieran en una única superficie de la esfera celeste. La profundidad de los espacios siderales se reducía a las eventuales esferas de las órbitas de los cuerpos próximos a nosotros (la Luna, Venus, Mercurio y el Sol), más allá de las cuales se sitúa el gran globo donde se encuentran «dibujadas» las constelaciones. La forma de estas fue explicada con numerosos mitos que contribuyeron a humanizar aquel cielo tan lejano, pero al mismo tiempo capaz de influir en las vicisitudes de los individuos. Ya no se preguntaba «¿Cuándo naciste?», sino «¿Dónde naciste?»: «Bajo el cielo de Leo». Un «dónde», por tanto, muy desvalorizado.

El precio que hubo que pagar fue tener un cielo más pequeño y finito; la astromancia fue un enorme paso atrás en la percepción de la lejanía de los cuerpos celestes.

Por el contrario, en aquellos mismos siglos, la percepción espacial del mundo terrestre se ampliaba y perfeccionaba. Aunque es prematuro considerar cartográfica la obra de quien en Val Camonica quiso representar sobre una roca la forma y los confines de algunos campos ya en el segundo milenio a. C., la finalidad práctica y la capacidad de abstracción de estas pinturas son evidentes. Por motivos análogos, pero a una escala mucho mayor, los egipcios, según Heródoto, se habían dotado de una especie de protocatastro desde el siglo XVa. C., que iban actualizando continuamente en rollos de

papiro; en él se hallaban marcados con símbolos los mojones demarcadores que las crecidas del Nilo desplazaban o arrollaban. Totalmente cartográfico es también el célebre Mapa de las minas de oro, que data del siglo XIIaproximadamente, que en la actualidad se encuentra en el Museo Egipcio de Turín.

No obstante, la habilidad para diseñar pequeños espacios con fines prácticos no comportaba necesariamente la conciencia de la *forma orbis* y de sus dimensiones. Cuando el rey Tutmosis I invadió Mesopotamia (*ca*. 1500 a. C.), le asombró ver que el Éufrates corría hacia el sur, en dirección contraria respecto al Nilo. Aquello contrastaba probablemente con su concepción del espacio mitológico-jerárquico; y, sin embargo, desde hacía milenios, cualquier cazador, pastor o campesino sabía muy bien que el agua corre cuesta abajo, independientemente de la orientación de su curso. Faltaba, por tanto, la capacidad de relacionar, en una representación simbólica, vastos espacios orientados con su morfología y su descripción. En suma, faltaba una visión geográfica.

Pasamos ahora a lo que se conoce como Edad del Hierro, metal que los griegos llamaron *síderos*, quizá debido a que se encontraba en los meteoritos caídos del cielo. Del encuentro de los conocimientos atesorados en el Oriente Próximo con los de los Pueblos del Mar nacerían las nuevas formas de pensamiento que se encuentran en el origen de la denominada cultura occidental. Una de ellas, y tal vez la más importante, es la que sigue siendo nuestra categoría espacial.

# 3

## HISTORIA ANTIGUA (SIGLO XIA. C.-V A. C.)

A caballo entre el segundo y el primer milenio a. C. aparecen en escena poblaciones relativamente atrasadas respecto a las grandes civilizaciones de Oriente Medio, pero mucho más dinámicas y agresivas, debido también a que conocían mejor la siderurgia. Los egipcios llamaron a estas poblaciones Pueblos del Mar, dándoles un nombre genérico más significativo teñido de extrañeza geográfica. Probablemente haya que identificar a estos «extraños» con los licios, los protomicénicos, los cretenses, los sículos, los tirrenos y los sardos —en suma, con los habitantes del arco septentrional del Mediterráneo —. El mundo básicamente continental de las monarquías del Creciente Fértil se vio obligado a revisar su propia geopolítica, como diríamos hoy, y, en todo caso, a reflexionar sobre el tamaño del mundo habitable.

Creta se presentaba como puente natural entre la costa sudoriental y las islas de la costa noroccidental. Para quien navegaba a vista de costa por la cuenca del Mediterráneo la cima nevada del monte Ida constituía un «centro» visible, en virtud del cual fueron denominados los vientos gregal (de las Cícladas griegas al nordeste), siroco (de Siria al sureste) y lebeche (de Libia al suroeste). Otro punto de referencia, visible a menudo también de noche, era el Etna en erupción, más allá del cual la mitología homérica —que recoge conocimientos atesorados en los primeros siglos del primer milenio a. C.— situaba el mundo fantástico de lo sobrenatural. Otra rareza del Mediterráneo occidental era la isla fluctuante de Eolo, imaginada al norte de Sicilia, donde los vientos del norte se mezclaban con las corrientes marinas entre Escila y Caribdis —tierras y mares peligrosos y desconocidos para los pelasgos—.

Y, sin embargo, desde las costas del Mediterráneo septentrional —después conocidas como del mar Tirreno y del Adriático— un pueblo no indoeuropeo, el etrusco, que disponía de hierro y lo sabía trabajar, entró en contacto con el mundo griego y, a través de este, con las

civilizaciones orientales. Como solo conocemos la percepción del espacio terrestre y celeste propia de la civilización etrusca a través de documentos posteriores al contacto antes mencionado, históricamente seguro solo desde el siglo IX a. C., no es fácil saber cuánto tenía dicha percepción de original, y cuánto de compartida o de transmitida de otras culturas. Para los etruscos, el espacio visible —tanto el terrestre como el celeste— estaba organizado según una visión cuatripartita (no cuadrada), cuyas cuatro «partes» estaban marcadas por los ejes del movimiento aparente del Sol. En el cielo se encuentran los dioses Consentes, asimilables al panteón griego y relacionados a menudo, por tanto, con los astros visibles; mientras que en los espacios siderales, más allá de lo visible, se encuentran los dioses Consentes. Aquí no nos interesa la concepción teológica de los etruscos, sino su intuición de que el espacio celeste iba mucho más allá de lo visible.

En lo que se refiere a nuestro pequeño espacio terrestre, debemos a los etruscos la palabra «mundo», que significaba el hábitat del hombre, el lugar salubre donde puede establecerse y vivir, generalmente en las alturas; las zonas inhóspitas, pantanosas y maláricas se denominaban, en cambio, «inmundas».

Aparte de este legado, la mayor contribución etrusca a los romanos fue la transmisión de la arquitectura militar, el *castrum* y la delimitación ortogonal de los terrenos realizada por los gromáticos, que después sería teorizada por Hipódamo de Mileto en su planeamiento urbanístico. Esta concepción se configuraba en torno al espacio vital por excelencia: la urbe y el orbe, la ciudad y el mundo, o sea, el cuadrado y el círculo. El máximo orden espacial debía expandirse desde un centro, símbolo del poder ordinativo. No era una idea nueva, sino que ya latía en el poder celeste de Akenatón, en el poder divino del emperador chino y habría de latir en el poder militar de Diocleciano. Durante más de dos mil años, en circunstancias históricas diferentes, se trataba, de una manera o de otra, de adaptar de forma autoritaria un minúsculo espacio terrestre a un imaginario espacio celeste análogo.

En el siglo X a. C., el Imperio neoasirio incluía los archipiélagos griegos, de modo que no solo recibió (a través de Creta) los conocimientos egipcios, sino también los mesopotámicos.

Los asirios de Nínive desarrollaron el cálculo de la periodicidad de los fenómenos astrales (obviamente aquellos observables a simple vista, como los movimientos de los cinco planetas y de la Luna, así como los eclipses de Sol y de Luna), ayudados también por el desarrollo del cálculo sexagesimal, especialmente apropiado para las observaciones astronómicas. A partir del siglo VIII a. C. las efemérides celestes (listados de magnitudes astronómicas variables relativas a estrellas y planetas —sobre todo posiciones—, calculadas en

determinados intervalos de tiempo [se trata de una especie de diario astronómico]) fueron compiladas por la casta sacerdotal de los Magos y registradas por los archiveros reales, junto a noticias y previsiones más o menos relacionadas con las mismas. Estos «diarios astronómicos» se siguieron elaborando de una forma casi ininterrumpida durante siete siglos. Los fenicios, o sea, los asirios de la costa, utilizando los datos contenidos en aquellos diarios, delinearon un mapa que abarcaba desde el estrecho de Gibraltar al golfo de Adén, es decir, la vasta cuenca de sus tráficos marítimos; estaba diseñado en franjas concéntricas, pormenor que revela un «mapa mental» muy diferente al de los pastores nómadas. A partir de este mapa, el jónico Anaximandro concibió una teoría geoastronómica para uso de los navegantes griegos, sintetizada en el célebre dibujo en forma de disco a él atribuido: una Tierra plana e inmóvil formada por tres bloques continentales separados por mares, y a su vez «flotante». ¿Cómo si no, se preguntaba Anaximandro, podía estar suspendida en el centro del universo?

Tales de Mileto, conciudadano y maestro de Anaximandro, también había sido deudor de los conocimientos asirios. La novedad conceptual de su escuela se puede sintetizar así: en la astronomía griega el objetivo era comprender la estructura del cosmos, más que predecir el porvenir; se aspiraba a lo que es estable y permanente bajo el aspecto mudable del devenir[3].

Sin embargo, parece que, más allá de la inspiración gnoseológica, venerada por todos los filósofos de Occidente desde hace veintisiete siglos hasta hoy, los fines prácticos presentes en el pensamiento griego primitivo no fueron inferiores a los de los magos caldeos, pero sí tomaron otras direcciones.

Los magos del Próximo Oriente dieron prioridad a la aritmética, y los griegos, a partir de Tales de Mileto, a la geometría. Esta última no era más que la visualización espacial de los problemas que se planteaban los matemáticos, sin darse cuenta de la falta de correspondencia entre los dos campos, como más tarde ejemplificó la proverbial paradoja de Aquiles y la tortuga, enunciada por Zenón de Elea en el siglo IVa. C., con una evidente ironía hacia la antigua e influyente escuela jónica.

El pensamiento matemático no se rindió del todo a las conclusiones de un debate que reflejaba la lucha por la hegemonía comercial en los mares. En su máxima elaboración, expresada por la escuela pitagórica, la aritmética era declarada útil mientras se atenía a lo «finito». El cosmos se identificaba con el orden numerable, y el caos, con el infinito. Según Pitágoras, el espacio celeste limítrofe, el más cercano, era, por tanto, ordenable, pero no medible. Todo lo demás está «sumido en unas inmensas tinieblas»[4] que es imposible

explorar. Tales aseveraciones no eran demostrables, por lo que el pensamiento pitagórico decayó hacia una dogmática que resultó funesta para él. A finales del siglo V a. C. el pitagórico Filolao de Crotona llegó a conjeturar un «centro de energía» en torno al cual giraba tanto nuestro planeta como el Sol y los demás planetas. Hoy sería muy aventurado encontrar en la visión de Filolao algún elemento precursor del sistema copernicano, pero es indudable que el pensamiento matemático de los filósofos de la Magna Grecia se abría a hipótesis que seguirían siendo inadmisibles durante otros veinte siglos. Los razonamientos «espaciales» de la escuela de Elea (siglos V-IV a. C.) «suscitaron en los griegos tal desconfianza en relación con el infinito que hicieron todo lo que estuvo en su mano para evitar este concepto en cualquier construcción científica seria»[5].

Mientras vemos consolidarse sucesivamente en el Mediterráneo la hegemonía mercantil, política y cultural de los griegos (de forma sumaria, en las guerras persas, el imperialismo macedónico y el expansionismo romano), en aquel largo proceso conocido con el nombre de helenismo, podemos seguir también la consolidación del pensamiento astronómico y geográfico en torno a «certezas», a sistemas de conocimientos organizados, sistemas útiles, pero rígidos.

En lo que al «dónde» se refiere, el siglo IV a. C. es verdaderamente crucial, pero solo hasta cierto punto.

Platón presentó un modelo simplista y mecánico del cosmos; su hiperuranio es un ultramundo que no tiene prácticamente nada que ver con una visión astronómica.

Aristóteles, adhiriéndose a la tradición presocrática, restableció la posibilidad de una ciencia de la naturaleza, dándole, no obstante, un significado más limitado. En su planteamiento, el cielo y sus cuerpos son eternos e incorruptibles, todo gira alrededor de la Tierra, y solo el mundo sensible es digno de ser estudiado. No negaba la existencia de un infinito conceptual, pero sí que el universo como magnitud sensible fuera infinito. La Tierra fue situada en el centro de cincuenta y seis esferas concéntricas, siendo la de las estrellas fijas la más exterior de todas ellas. El tamaño de nuestro planeta fue establecido ideológicamente, no basándose en cálculos, en 400.000 estadios (*ca.*70.000 km).

También Epicuro tuvo una concepción del espacio celeste que prescindía de la matemática, llegando a afirmar que los cuerpos luminosos son realmente tan pequeños como parecen y que no vale la pena medir sus movimientos. La suya era una batalla ideológica contra los Magos de Oriente y contra los que sostenían que la regularidad de los movimientos astrales se debía a su «naturaleza divina»; sin embargo, para hacer frente a esa superstición, acabó rechazando todo método de investigación que se basara en los

cálculos. Esto supuso una gran limitación de cara a la investigación, que no podía recurrir a instrumentos ópticos.

A lo largo del siglo IV hubo también investigadores menos interesados en construir sistemas de pensamiento que en observar, calcular y comprender. No son tan famosos como los filósofos antes citados, pero su contribución a la comprensión del espacio terrestre fue, a juicio de la posteridad, mucho más significativa.

A Heráclides Póntico se le atribuye la hipótesis de la rotación de Venus y Mercurio alrededor del Sol; Eudoxo de Cnido, librepensador que había estudiado en Egipto, trató de calcular la medida del meridiano terrestre, atribuyéndole una longitud de 74.000 km —casi el doble de lo que mide realmente (40.000 km)—, pero la Tierra solo se podía concebir bien grande, ya que estaba en el centro del universo; Calipo de Cícico, su alumno, corrigió con cálculos todavía más elaborados el sistema de las esferas geocéntricas de Eudoxo. Aunque la matemática fue progresando, lo que sucedía en el espacio extraterrestre seguía siendo una conjetura.

Aristóteles no fue indiferente a estos pensadores, pero probablemente no los comprendiera, o bien sus hipótesis no encajaban orgánicamente en el sistema por él elaborado. «En todo el corpus aristotélico no hay una sola prueba consistente del conocimiento de las estaciones ni de las retrogradaciones de los cinco planetas»[6].

El aparente movimiento retrógrado de los planetas, que se verifica en todos los planetas del sistema solar, era desconcertante y dio lugar al término «planetas», del griego antiguo *plànetes astéres* («estrellas vagabundas»). En contra de la física aristotélica, que creía que los planetas se movían de forma circular y uniforme, la retrogradación de los planetas la habían resuelto Apolonio de Perga e Hiparco de Nicea al modificar el sistema geocéntrico de esferas concéntricas con una oportuna combinación de epiciclos y deferentes. Después Ptolomeo lo perfeccionó (de hecho, lo complicó) y, con el *Almagesto*, difundió la teoría de los epiciclos tanto en Oriente como en Occidente. Solo un fortísimo condicionamiento antropocéntrico que consideraba la Tierra como inmóvil y central pudo haberle impedido a Ptolomeo, y a cualquier otro durante siglos después de él, darse cuenta de hasta qué punto era complicada su construcción con circunferencias cuyo centro (el epiciclo) gira a lo largo de otras circunferencias mayores (el deferente), y con qué sencillez habrían podido describirse los movimientos planetarios introduciendo en cambio el movimiento de revolución de la Tierra alrededor del Sol.

En el siglo III a. C. un aristotélico de cuarta generación, Aristarco de Samos, llamado «el Matemático», se interesó por los resultados de las especulaciones de los pitagóricos. Tuvo el mérito de centrar la investigación en las dimensiones de los cuerpos celestes y en las

distancias que median entre ellos. Según Arquímedes, Aristarco «divulgó por escrito ciertas hipótesis» (en otras traducciones, lo que Arquímedes comenta de él es que «hizo accesibles algunas hipótesis»).

¿Qué hipótesis? Que la Tierra era la que giraba alrededor del Sol y que este último guardaba una proporción inconmensurable con la esfera de las estrellas fijas, similar a la relación existente entre el punto que está en el centro de una esfera y la superficie de la misma.

Más que la idea heliocéntrica, que como hemos dicho ya circulaba entre los sabios, esta última intuición convierte a Aristarco en el precursor de una visión del espacio estelar encuadrable en una geometría que no era practicable debido a la vastedad de las dimensiones imaginables. La idea de la relación «inconmensurable» se debía a su conciencia de que la rotación de la Tierra alrededor del Sol implicaba la inevitabilidad de movimientos paralácticos aparentes de las estrellas, movimientos que no conseguía observar. De ahí la necesidad de situar las estrellas a distancias «inconmensurables». Habrá que esperar al siglo XIX y al desarrollo de una adecuada instrumentación óptica para lograr medir el desplazamiento paraláctico de las estrellas más cercanas, que son las que tienen un desplazamiento mayor. Dicho desplazamiento es del orden de una fracción de segundo de arco; por tanto, demasiado pequeño para ser percibido, no solo a simple vista, sino ni siquiera con los instrumentos desarrollados en los primeros dos siglos de la astronomía posgalileana. La distancia calculada para estas estrellas resultó ser de diez años luz, más de doce millones de veces la distancia entre la Tierra y el Sol obtenida por Hiparco precisamente con el método del paralaje utilizado por Aristarco para calcular la distancia de la Tierra a la Luna. Estas distancias, además de inconmensurables, eran inimaginables en aquella época.

Como sigue afirmando Bowen: «La ciencia del cielo griega [en época preptolemaica] era eminentemente figurativa y cuantitativa. Su finalidad era […] representar por medio de figuras geométricas los cambios de carácter general observables en el cielo, incluyéndolos en una perspectiva filosófica que privilegiaba la comprensión de lo que las cosas son respecto a lo que hacen»[7]. Con una gran trivialización: si el Sol ilumina, importa relativamente poco que lo haga girando alrededor de la Tierra o viceversa, que sea un disco que rueda en lugar de una esfera que rueda.

En pleno esplendor de la época alejandrina, entre el siglo III a. C. y el II d. C., la reflexión teorética de Aristarco sobre la esfera, entendida como representación geométrica, condujo a consistentes resultados prácticos. Así, por ejemplo, en el campo de la óptica, la invención de los espejos ustorios atribuida a Arquímedes es la aplicación de estudios sobre las porciones cóncavas de la esfera. Dicearco de Mesina,

aplicando las coordenadas esféricas al globo terrestre, inventa el «punto» geográfico aún vigente —latitud sur o norte desde el ecuador, y longitud este u oeste desde un meridiano base—. Eratóstenes, en la geografía aplicada, además de acuñar la propia palabra «geografía», calcula con precisión el meridiano y proyecta la esfera armilar, y delinea además un mapa del mundo conocido completamente legible. Según Eusebio de Cesarea, Eratóstenes se aventuró a medir las distancias entre la Tierra, la Luna y el Sol, pero sus cálculos se perdieron.

En otros niveles especulativos se movió Gémino (siglo I a. C.). En su *Introducción a los fenómenos* planteó cuestiones inéditas respecto a la distinción entre lo real y lo aparente, dada la incongruencia entre los valores aritméticos y los valores periódicos manifestados por los cuerpos celestes. Un siglo después, Menelao de Alejandría exponía en su obra *Sphaerica* el teorema que lleva su nombre —aunque probablemente fuera más antiguo—, las conquistas de la trigonometría esférica que podrían de alguna forma combatir la discrepancia. Había llegado el momento de que de la escuela de Alejandría surgiera «una ciencia del cielo que no solo es capaz de satisfacer los tradicionales requisitos filosóficos y cosmológicos, sino que además está basada en una serie de procedimientos de cálculo mucho más rigurosos y coherentes que los del pasado»[8]. Así, a principios del siglo II, Claudio Ptolomeo asumió la ingente tarea de organizar la suma de conocimientos adquiridos en quinientos años de investigaciones y especulaciones.

En su texto más célebre y afortunado, *Hè megalè syntaxis* (en español, «Composición matemática», mil años después divulgado como el *Almagesto*, Ptolomeo afirmó que el cielo es esférico, lo mismo que la Tierra, la cual tiene el tamaño de un punto respecto al cielo, en el centro del cual se encuentra inmóvil.

En sus *Hipótesis de los planetas* estableció que la distancia entre la Tierra y la Luna equivalía por término medio a sesenta radios terrestres aproximadamente. Pero que la distancia entre la Tierra y el Sol era de 1.210 radios, es decir, un valor aproximadamente veinte veces inferior al real; del mismo modo, para las esferas concéntricas se establecieron distancias mucho menores que las reales.

En su obra *Geografía*, Ptolomeo trató de acompañar los datos de viajes atesorados en la Biblioteca de Alejandría con una representación gráfica, en proyección cónica, de las tierras conocidas apenas más extensa que el dibujo realizado en tiempos de Eratóstenes, pero con valores latitudinales, y sobre todo longitudinales, disminuidos. En suma, un mundo pequeño, no demasiado alejado de los astros que lo influyen, el Sol y la Luna, y con un cielo con menos de cincuenta figuras astrales útiles para orientarse. «Este universo

adquiría así unos rasgos que lo hacían racionalmente satisfactorio, un cosmos en el sentido griego del término»[9].

Para Pierre Duhem y otros epistemólogos modernos se trataba de una «concepción instrumentalista», formulada por Ptolomeo con el lema de «salvar los fenómenos». Es dudoso que el gran estudioso alejandrino considerara así su ciencia. La admiración que le rindieron sus descendientes —después veremos por qué— se basó esencialmente en la accesibilidad de esta visión ordenada, limitada y acabada. Y podríamos añadir que tranquilizadora.

Cuando el Imperio de Augusto consolidó sus dominios, la mentalidad práctica de los romanos ejerció su influencia en el pensamiento helenístico, del que Roma se apropió del mismo modo que se conquista una mina de oro o un emplazamiento estratégico. El historiador y geógrafo griego Estrabón, al dedicar su obra al césar, afirmó: «La geografía está orientada esencialmente a las necesidades de la vida política. De hecho, el escenario de nuestras acciones está constituido por la tierra y por el mar en el que vivimos: a pequeñas acciones [corresponden] pequeños escenarios»[10]. Pomponio Mela, nacido en las costas del océano Atlántico (concretamente, en Tingentera, actual Algeciras), «en el límite con la nada», dedicó al emperador Claudio su *De Chorographia*, donde defendía la mayor utilidad de los mapas regionales, elaborados a escala menor y por tanto más exactos que cualquier mapamundi. En el siglo I se pensaba obviamente en el mapamundi de Eratóstenes; en él se basó, por ejemplo, un trotamundos como el poeta Dionisio Periegeta, cuyos relatos de viajes se consideraban todavía autorizados en los monasterios basilios del siglo VI.

En suma, este era el entorno intelectual en el que surgió la obra de Ptolomeo. Sin embargo, tardaría mucho en convertirse en el sistema ptolemaico, es decir, en la *auctoritas*.

En el campo teorético, un contemporáneo de Ptolomeo, Seleuco de Babilonia, demostró como un hecho físico, a través de la observación de las mareas y otros fenómenos, que la Tierra «giraba» sobre su propio eje y daba vueltas alrededor del Sol; hipotetizó además un universo infinito. No nos ha llegado ninguna obra suya, pero disponemos de la suficiente información como para poder afirmar que, al menos en el terreno académico, las hipótesis heliocéntricas de Aristarco no habían sido completamente abandonadas.

Mientras tanto, entre los siglos III y IV, la escuela de Alejandría divulgó las colecciones de Ptolomeo, sobre todo a través de comentarios y manuales prácticos para utilizar las tablas de cálculo. Artemidoro criticó sus imprecisiones numéricas, Papo las simplificó, Teón, alumno de este último, las revisó y explicó, e Hipatia, celebérrima hija de Teón, quizá incluso inventó instrumentos útiles

para la aplicación de esas mismas tablas.

El marco filosófico de estos pensadores es el neoplatonismo, a pesar de que la sistematicidad de Ptolomeo se adaptara conceptualmente más al esfuerzo ordenador del aristotelismo. Era un neoplatonismo en el que fluctuaban el pensamiento gnóstico, los cultos astrales mitraicos y el cristianismo, o al menos algunas corrientes vivas de él. Sinesio, un ptolemaico alejandrino colega de Teón, llegó incluso a ser obispo de Cirene a avanzada edad. Con todo, la autoridad del sistema ptolemaico no se consolidó hasta que, en pleno siglo V, el neoplatónico Proclo, pese a levantar dudas sobre la fiabilidad de los datos de observación, afirmó que la visión cosmológica de Ptolomeo era la correcta. Proclo no era cristiano, pero era el director de la Academia de Atenas, con mucho prestigio en la corte de Constantinopla.

Cuando el emperador Justiniano, a mediados del siglo VI, encargó al arquitecto Antemio de Trales reedificar la basílica de Santa Sofía «a imagen del cosmos», este recurrió a Eutocio de Alejandría, defensor del pensamiento ptolemaico. En el siglo siguiente, el emperador Heraclio encargó a los alejandrinos Stefano y Olimpiodoro tablas y manuales ptolemaicos, que ambos compilaron basándose en los trabajos de Teón. La autoridad «institucional» de Ptolomeo era clara y completa. Y con esta asunción terminaba también la época helenística.

# 4

## LA ALTA EDAD MEDIA (SIGLOS VI-XI)

Los milenios y los siglos que hemos descrito hasta ahora, a grandes líneas, muestran escenarios variados, pero (*a posteriori* y en lo que al área mediterránea se refiere) en general progresivos. La tendencia, aunque no lineal, fue hacia una ampliación del conocimiento o hacia su consolidación sistemática.

La centuria a caballo entre los siglos VI y VII de nuestra era representa, en cambio, un momento de ruptura. De hecho, los conocimientos cosmológicos y geográficos relativos a la percepción del espacio se resintieron por la profunda crisis política en curso, siendo ellos mismos parte de un sistema de pensamiento en disgregación y remodelación.

Los motivos de esta disgregación fueron tres, con eficacia y resultados diferentes e incoherentes entre sí: la invasión y el dominio de los pueblos germánicos, la hegemonía religiosa del cristianismo y la escisión del Mediterráneo en dos (una orilla cristiana y otra islámica).

«Los pueblos germánicos representan en la Antigüedad el factor directo de la mayor obra de disolución que los anales del mundo recuerdan». Con esta valoración, hoy solo en parte atenuable, comienza la entrada dedicada a los antiguos germanos en la *Enciclopedia Italiana Treccani* (entrada redactada hace aproximadamente ochenta años y basada por lo demás en unas fuentes principalmente alemanas). Los germanos, poblaciones nómadas en continuo movimiento, «esquilmaban» el territorio, entendido no como unidad geográfica, sino como hábitat capaz de proporcionar recursos elementales (agua, pastos y bosques). Por consiguiente, no habían desarrollado ninguna forma de agrimensura, ya que el único motivo por el que necesitaban percibir el espacio bidimensional era por lo que este ofrecía de forma inmediata. Del mismo modo, las distancias lineales solo se medían en días de viaje; los recorridos eran concebidos con arreglo a una economía itinerante, y la meta a la que se aspiraba era lo que ofrecieran recursos locales inmediatos, evitando tanto los

obstáculos morfológicos sobre el terreno como los eventuales contactos o conflictos con los grupos humanos rivales. Tales condiciones de vida excluían cualquier conceptualización de un «centro» geográfico y, por lo tanto, de un orden del espacio circundante. Igual de limitativa era, por ende, la visión del espacio menos próximo, visión que conocemos a través de los mitos cosmogónicos transmitidos por los *Eddas*escandinavos. La «Tierra Media» es el espacio habitado por los hombres, un disco plano rodeado por un océano impenetrable, sostenido por un árbol primordial, debajo del cual se encuentra el territorio de los muertos; los rayos y los truenos provienen de un cielo por lo general nublado, manifestación de los dioses que viven entre esas nubes tempestuosas; justo más allá de ellas, el Sol y la Luna huyen perseguidos por fuerzas maléficas; no hay ningún mito relacionado con las estrellas, meros puntos luminosos que decoran un casquete semejante a un escudo.

Las poblaciones germánicas llevaron esta visión elemental a los campos de Romania, primero saqueados y después ocupados y sometidos a lo largo de más de siglo y medio, a partir del año 400 a. C. aproximadamente; en las ciudades se apagaban una tras otra las escuelas donde las élites dirigentes con cultura latina conservaban, casi como una sabiduría esotérica carente de influencia en el saber popular, el bagaje de conocimientos propios de la época clásica.

Las aristocracias de los vándalos en el norte de África, de los visigodos en Iberia y de los francos en la Galia se fueron asimilando a los romanos en las formas de ejercer el poder, pero no en la cultura. En Italia, fue incluso peor: los ostrogodos mantuvieron una guerra de diez años con los bizantinos que, a mediados del siglo VI, dejó a la península itálica agotada. En el año 568 entraron en la misma varias tribus nómadas, las más periféricas y primitivas del múltiple pueblo germánico, guiadas por los lombardos. Fue el golpe de gracia. El sistema de pensamiento romano se vino abajo, al igual que sus infraestructuras; se consumó una divergencia total con la cultura grecolatina, que, no obstante, sobrevivía y seguía evolucionando en parte en la zona oriental del Mediterráneo.

Los germanos establecidos en la Romania adoptaron distintas doctrinas cristianas dependiendo del grado de primitivismo de cada etnia. Así, los vándalos y los lombardos abrazaron el arrianismo, cuya teología era muy sencilla, que contemplaba fundamentalmente un enfrentamiento entre fuerzas benéficas y maléficas; los francos, los más civilizados de los germanos, se hicieron católicos. En los mismos decenios de la invasión lombarda en Italia, Gregorio de Tours, el culto obispo franco, esbozaba ya una historia de su pueblo donde sostenía un significativo sincretismo entre religión popular romana y religión popular germánica; demonios, santos, héroes y magos eran la

encarnación de las potencias sobrenaturales en eterna lucha. Gregorio opina que es útil convertir a los *tempestarii* que controlan el mal tiempo y dialogan con Odín «el Furioso», que las liturgias píricas agradan a Dios (las hogueras de San Juan), y que hay que interpretar los *tremenda* —o sea, los hechos inexplicables— y no tratar de comprender la causa.

«Esta actitud mental es característica de toda la mentalidad religiosa popular de estos siglos (V-IX) y, dicho sea de paso, de gran parte de la Edad Media»[11]. El cielo, entendido también únicamente como fantasiosa morada de los dioses, desapareció del escenario especulativo; con la llegada de los germanos el espacio se había reducido enormemente.

Mientras tanto, pero «como en otro planeta», en Constantinopla continuaba la reflexión cosmológica por parte de los filósofos cristianos, unas veces hacia estériles direcciones dogmáticas, y otras con resultados sorprendentes; pero siempre marcada por la ruptura con el anterior periodo helenístico.

Cosmas Indicopleustes, «que viajó a la India», compiló una *Topografía cristiana* en la que se afirmaba que el mundo no podía tener forma ni movimiento alguno que estuviera en contradicción con las Sagradas Escrituras; incluso los Padres de la Iglesia, que perpetuaban su memoria, refutaron esa tesis. Mucho más articulada es la argumentación antiptolemaica del filósofo cristiano Juan Filópono (*ca.* 490-*ca.* 570). En su *De opificio mundi* afirma: «¿Quién puede decirnos la causa de la precesión de los equinoccios? Nadie será capaz de explicar el número de astros, su posición, disposición y diferentes colores. Conocemos las causas de poquísimas cosas evidentes, y si no nos es posible describir las causas naturales de las cosas evidentes, tampoco podemos pretender explicar la causa de las cosas ocultas»[12]. Filópono se burla de los seguidores de Ptolomeo, que «piensan que pueden describir los movimientos celestes en relación con la superposición de figuras geométricas», y señala, al menos de forma implícita, el déficit de instrumental astronómico de su época. Limitándose honestamente a una conjetura teórica que no entrara en conflicto con la teología, Filópono imaginó el espacio como una superficie tridimensional vacía por definición, aunque en realidad los cuerpos nunca están ausentes de él. Dado que el espacio como tal «no tiene la capacidad» de disponer los cuerpos celestes, lo que llamamos cosmos —es decir, el orden celeste— solo sería explicable mediante la voluntad del Creador. En su rendición ante lo inexplicable, Filópono coincidía con Aristóteles: el universo es finito, no infinito, entendiendo por universo lo que llegamos a observar. Sin embargo, disentía del aristotelismo en lo referente a la naturaleza de los cuerpos: dado que es el mismo sustrato tridimensional lo que subyace a las razones del

cosmos, es razonable suponer que los cuerpos celestes sean corruptibles, como la Tierra. Leído en clave moderna, las leyes químico-físicas que rigen nuestra Tierra deben ser también válidas para los cuerpos celestes. Habrá que esperar a Dante para que ideas parecidas vuelvan a aparecer en los pensadores europeos. Como afirma el historiador de la ciencia C. Wildberg, «Filópono no ejerció prácticamente influencia alguna en su tiempo, pero sus ideas encontrarían terreno abonado en el siglo XVI»[13].

En cuanto a los conocimientos compartidos por la desaparecida comunidad intelectual de la Alta Edad Media, mucho mayor peso tuvo el sistema simbólico elaborado por el visigodo Isidoro, obispo de Sevilla (*ca.* 556-636): «Gracias a su complejidad somos capaces de ver cuáles serán las orientaciones principales del pensamiento medieval»[14]. En el *Liber rotarum* —parte de la farragosa obra *De natura rerum*— Isidoro utilizó las ideas cosmológicas helenísticas que le habían llegado a través de Higino (64 a. C.-17 d. C.), un mitógrafo que explicaba el aspecto del cielo por medio de *fabulae*, los mitos que imaginaban poéticamente el origen de las constelaciones. La fantasiosa sensibilidad de Isidoro, de matriz germánica, era decididamente más propensa a aceptar el relato de Higino que los cómputos astronómicos ptolemaicos. Sin embargo, el «cielo rotatorio» no es tan ingenuo como podría parecer viendo las esquematizaciones simbólicas, tan importantes para Isidoro. Las estrellas —afirma— son ciertamente fijas e inmóviles, pero se encuentran a diferentes distancias de la Tierra; algunas parecen más pequeñas y menos luminosas, pero no porque sean así, sino porque están más lejos. El doctor de la Iglesia sevillano superpuso además a los mitos clásicos el pensamiento teológico de Casiodoro, el mayor pensador cristiano de la generación anterior. Para Casiodoro, la astronomía, al ser una disciplina centrada en el cielo, debía favorecer la contemplación de la divinidad: *quod ordinatum et ordinabile est* (el cosmos) es propio de la divinidad. Simplificando al máximo, la astronomía, según Isidoro, puede ser un relato descriptivo de los astros, una «contemplación»; la investigación y la medición son competencia del teólogo. El universo que el sevillano lega a los siglos venideros es altamente simbólico y esquemático. Y claramente pequeño.

En este mismo orden de pensamiento se movió, aunque demostrando otras habilidades muy diferentes, el abate irlandés Commian, contemporáneo de Isidoro. De incierta identificación[15], es conocido en cualquier caso por los complejos cálculos que trataban de hacer congruentes el año solar (con una longitud de 365 días y «casi» un cuarto, de aquí la necesidad de añadir un día «casi» cada cuatro años) y el año lunar (basado en los ciclos lunares de 28 días; por tanto, 13 ciclos de 28 días sumaban un total de 364 días). Se trataba

de algo muy elaborado para la época, pero su única finalidad era establecer con exactitud el calendario litúrgico y calcular la Pascua.

Alrededor de un siglo después, el cristianismo británico produjo otro pensador que influyó durante toda la Edad Media: Beda (*ca.* 672/673-735). Mientras Europa, desde Anatolia a los Pirineos, se hallaba volcada en la contención del avance islámico y dejaban de funcionar los milenarios centros de estudios de Mesopotamia y de Egipto, en las Islas Afortunadas del septentrión sobrevivían lugares de investigación que disponían de bibliotecas clásicas. Aquí se formó el monje Beda; no desarrolló argumentaciones espaciales ni geométricas en el campo de la astronomía, pero por su insistencia en hacer aceptables algunos conocimientos clásicos podemos comprender con qué ideas generalizadas tuvo que enfrentarse. La Tierra —afirma en su *De natura rerum*— es esférica y no plana, como son esféricos también los cielos que la envuelven y no «se alzan sobre ella cóncavos como un escudo». A los nueve cielos tradicionales, Beda añadió un décimo cielo, remoto e inescrutable. La teología, los conocimientos y los medios de exploración de su época no le permitieron decir honestamente nada más.

No creemos que sea una proyección *a posteriori* ver en esta impenetrabilidad del décimo cielo la digna rendición de un pensador que se da cuenta de que no puede ir más allá, pero se percata de que ese «más allá» existe…

Un par de generaciones después, el llamado Renacimiento carolingio replanteó la especulación científica de una forma más sistemática. Partiendo de los nuevos conceptos de cálculo relativos a los movimientos astrales, se podía allanar el camino para la descripción de un espacio celeste más dinámico, más complejo, aunque no por ello percibido de forma inmediata como más vasto.

Alcuino (*ca.* 735-804) debe su notoriedad a haber organizado para Carlomagno las *scholae* de acuerdo con un proyecto no tanto pedagógico como político que preveía un tipo de conocimientos estándar (incluyendo la astronomía como parte de las artes del *Quadrivium*) a disposición de la clase dirigente cristiano-germánica a la que había que educar. El objetivo era una consolidación de lo conocido, no un incentivo para incrementarlo; de hecho, la batalla ideológica de Alcuino iba dirigida principalmente contra las corrientes gnósticas, en nombre de la inescrutabilidad de la obra divina y de conformidad con las Escrituras. Una empresa muy admirable, pero, como todas las empresas jerárquicas y un poco urgentes, no dirigida a una apertura del espíritu, sino a un atrincheramiento del saber ortodoxo. El único texto suyo que nos ha llegado referente al cielo trata del movimiento de la Luna, también para el cómputo del calendario litúrgico. Si Beda vio en los límites del conocimiento la

miseria de la investigación humana, Alcuino hizo de tales límites una frontera que no había que cruzar.

En la época carolingia destacan por su esfuerzo exploratorio Rabano Mauro (m. 856), que teorizó principalmente sobre física de la materia celeste, llegando a afirmar que si el firmamento brilla es porque es de hielo sólido, y su alumno Walafrido Estrabón (808/809-849), que, polemizando con su maestro, sentenció que el «cielo no es solo el firmamento visible, sino también cielo empíreo, es decir, cielo ardiente o del intelecto. No se le llama empíreo a causa de su ardor, sino de su resplandor». Walafrido fue conocido durante toda la Edad Media como el autor de *Hortulus*, que no es solo un manual de herboristería, sino también una metáfora del limitadísimo campo que al sabio le convenía cultivar. Como se ve, los dos disertaron sobre materia, temperaturas, luminosidad —temas directamente relacionados con la disciplina que más tarde recibirá el nombre de astrofísica—, pero su enfoque conceptual era, como no podía ser de otra manera, exclusivamente especulativo.

Y, sin embargo, entre tanta incertidumbre en las direcciones de investigación, se abre paso lentamente una intuición que solo posteriormente se convertirá en convicción: sin instrumentación material y basándose exclusivamente en elucubraciones acompañadas, en el mejor de los casos, de cálculos matemáticos, el conocimiento cosmológico no podrá avanzar.

En la primera mitad del siglo IX, Pacífico, archidiácono de la catedral de Verona, proyectó y probablemente construyó el nocturlabio. Se trataba de un tubo de observación apoyado en un soporte vertical y orientado hacia la parte del cielo afectada; el cilindro estaba rodeado por un disco graduado, de modo que, apuntando a la Estrella Polar, se podía seguir, si no propiamente medir, el movimiento de los astros circumpolares. Un siglo después, Gerberto de Aurillac (el papa Silvestre II) (*ca.* 940 a 950-1003) se proveerá de valiosas esferas armilares prácticamente desconocidas, proyectará modelos tridimensionales de las esferas celestes y tratará en vano de conseguir un instrumento del que había oído hablar, pero que ni siquiera llegó a ver representado: el astrolabio, que los árabes conocían desde hacía doscientos años.

Como decíamos, los siglos de la Alta Edad Media fueron para la cultura occidental un largo periodo de retroceso y, sobre todo, de aislamiento. Lo más grave, al menos en lo referente a la investigación astronómica y a la posibilidad de ampliar los horizontes espaciales del cosmos, fue la incomunicación con todo lo que estaba sucediendo en el mundo islámico.

Reducida la presión expansionista a mediados del siglo VIII, el pensamiento islámico supo acoger y aprovechar el acervo de

conocimientos de los pueblos conquistados y en parte asimilados. La astronomía india de Ariabhata fue traducida al árabe en el año 740, en 750 Said tradujo los textos zoroastrianos y, lo más importante de todo, en el año 785, el sirio Teófilo de Edesa difundió entre los árabes los conocimientos propios de la época alejandrina; la obra de Ptolomeo fue conocida en árabe hacia el año 820. Aquí nos limitaremos a recoger solo algunos datos significativos de la auténtica epopeya matemático-astronómica que vivió el Oriente Próximo en los siglos IX y X.

Los fines que impulsaron tan poderosa investigación fueron al principio de orden práctico, litúrgico (orientación en la plegaria, calendario lunar), cartográfico y astromántico, pero los resultados llegaron más lejos. A partir del año 820 el califa Al-Ma'mún promovió lo que se considera el primer caso históricamente probado de investigación colectiva financiada por el Estado: la apertura de monumentales observatorios astronómicos en Bagdad y Damasco, donde vivían y trabajaban docenas de estudiosos de diferentes disciplinas coordinados entre ellos. Dentro de ese contexto, el filósofo Al-Haggag, el matemático Abu Mansur y el astrónomo Al-Farghani tradujeron a Ptolomeo, comprobando sus cálculos, encontrando una medida más exacta del globo terrestre y reduciendo las partes, no insignificantes, de la astronomía ptolemaica marcadas por el empirismo. Otros estudiosos inventaron el cuadrante mural como apoyo del cálculo de la oblicuidad de la eclíptica. Este instrumento, que debe su nombre a su forma —se trata de un cuarto de círculo con dos radios, uno horizontal y el otro vertical—, se utilizaba para medir, con la mayor exactitud posible, la altura de los astros a su paso por el meridiano. La precisión alcanzable dependía de la meticulosidad de las incisiones (manuales) de las graduaciones a lo largo del arco de círculo; de aquí la necesidad de construir cuadrantes de grandes dimensiones y fijarlos sólidamente en un muro. La diferencia de la altura máxima alcanzada por las estrellas (así como por el sol) en los equinoccios y en los solsticios permitió determinar la inclinación del eje terrestre respecto a su plano orbital.

Las *Tablas verificadas* de Abu Mansur y el *Compendio de la ciencia de los astros* de Al-Farghani acompañaron así desde el principio la lectura del *Almagesto* ptolemaico, que no llegaría a Europa hasta trescientos años después. Entre los capítulos del *Compendio* hay uno dedicado a la distancia de los planetas, que, aunque por aproximación, amplía la visión del cielo observado desde la Tierra en un orden de distancias inaceptables para un contemporáneo europeo. El historiador de la ciencia J. F. Oudet observa: «Hubo un gran progreso en la práctica de las observaciones realizadas por los astrónomos árabes en comparación con el modelo ptolemaico en el que se inspiraban»[16]. La

interacción constante entre observación y teoría permitió el desarrollo de la crítica a Ptolomeo. No obstante, todavía no podía proponerse una alternativa a su sistema y a sus modelos geométricos. (Esta observación será útil para comprender que, más de siete siglos después, en Occidente siguiera siendo difícil plantear una crítica a Ptolomeo: precisamente porque la praxis carecía de esa interacción).

Perfeccionar los cálculos y las observaciones no significa necesariamente ampliar el espacio; por ejemplo, las mediciones geográficas de Al-Juarismi —quizá el científico más conocido de la escuela de Bagdad— supusieron la reducción de diez grados de longitud en la extensión del Mediterráneo, para gran estupor de los cartógrafos, que se atenían a la representación de Ptolomeo, y para alivio del califa, cuyos dominios andalusíes parecían así menos distantes de la capital mesopotámica. Al-Juarismi, al que se atribuyen un gran número de obras de distintas disciplinas, fue el bibliotecario del califa Al-Ma'mún y se encargó de coordinar las investigaciones. Lo que sorprende no es tanto la ingente cantidad de resultados (de los que la matemática es todavía deudora), sino el método —hallazgo de fuentes y noticias de todas las partes del mundo conocido y de todas las épocas, sin prejuicios religiosos, comprobación filológica de la traducción, comprobación con datos cruzados entre medición empírica y cálculo puro, diseño y realización de nuevos instrumentos—. No sabemos los nombres de quienes concibieron el astrolabio, pero sabemos que Al-Juarismi les reconocía tanto mérito como al herrero que después construyó el instrumento.

El gran impulso cognitivo no se agotó con el califato ilustrado de Al-Ma'mún. En la segunda mitad del siglo IX en Oriente se desarrollaron los centros de estudios en la región persa y en Occidente se fundó la Universidad de Fez —la fundadora, dicho sea de paso, fue una mujer—, algo memorable, pues desde Marruecos los conocimientos llegaron hasta España y después penetraron en Europa.

En el siglo siguiente, en el Observatorio Celeste de Damasco destacó entre otros Al-Battani (*ca.* 858-929), que calculó el diámetro aparente del Sol y la Luna para explicar los eclipses, poniendo en duda las dimensiones reales de las estrellas visibles. Desde latitudes más meridionales, el persa Al-Sufi (903-986) fue el primero en señalar la galaxia de Andrómeda (M 31), apenas perceptible a simple vista como un polvillo cuya naturaleza no supo definir, pero que intuyó más lejana que los astros del firmamento. Describió más de mil constelaciones en su *Libro de las estrellas fijas*, que no solo estaba maravillosamente ilustrado, sino también provisto de tablas sistemáticas que precisaban el desplazamiento y la magnitud de los cuerpos luminosos. Además de dominar el astrolabio, Al-Sufi recurrió probablemente a lugares de observación como la llamada «cámara de

Abu Sahal», documentada en Mesopotamia en aquellos decenios, un local proyectado como extensión del cuadrante mural con miras calibradas. Sin embargo, a los astrónomos de la época se les planteaba el problema de la limitación de los instrumentos ópticos: la gran cantidad de refinadas revisiones de cálculo aportadas a Ptolomeo requería una instrumentación óptica muy diferente a aquella de la que disponían. A este problema se dedicó el científico Alhacén (965-1040), quien, además de proponer una teoría corpuscular de la luz que parece anticipar la existencia de los fotones, estudió la anatomía del globo ocular y comprendió el funcionamiento natural de la inversión de las imágenes, es decir, el principio de la cámara oscura. La vastedad de su sabiduría (geométrica, astronómica y médica) le valió el título de «Ptolomeo segundo» y la indudable primacía de fundador de la óptica moderna. Alhacén, aunque no inventó el telescopio, fue todavía más lejos: estableció como método todas sus investigaciones y todos los resultados conseguidos sobre la duda. No solo fue perseguido en su patria —dado que veía en cualquier religión un obstáculo para el saber y la paz—, sino que además su bagaje de conocimientos tardó siglos, como veremos, en ser aceptado en Occidente debido a su antidogmatismo.

A caballo entre el primer y el segundo milenio trabajó también el persa Al-Biruni (973-1048), que postuló la rotación de la Tierra sobre un eje y precisó la medida de su radio; políglota, en sus obras cosmológicas y cartográficas resumió el estado del saber alcanzado hasta entonces utilizando los conocimientos recogidos desde China hasta Marruecos, pasando por la India y Grecia.

Ninguno de los científicos aquí recordados llegó a refutar el modelo ptolemaico, pero todos fueron plenamente conscientes de la posibilidad de que tuviera errores.

Si para el Occidente europeo el periodo del colapso fue el situado a caballo entre los siglos VI y VII, para la Europa bizantina el paso de la Antigüedad clásica a la Edad Media se consumó más tarde, pero de una forma igual de dramática para el conocimiento. De forma sumaria, la pérdida de Egipto y Siria, cuna del saber, la presión que ejercían los eslavos en los Balcanes, la anarquía interna debida a las guerras de religión (herejía iconoclasta) y finalmente el cisma con Roma llevaron a Constantinopla a un grave retroceso. En el siglo IX se crearon cuatro cátedras en la capital con unos objetivos no muy diferentes de los que tenían las de Alcuino. Una fue de astronomía, pero —como afirma A. Tihon— «los trabajos astronómicos fueron pocos, y no se ha conservado ningún tratado de los siglos IX ni X, salvo una tabla estelar actualizada en el año 854 y algunos cálculos de planetas fechados en el año 906 […]. Es probable que en este periodo una obra difícil como el *Almagesto* no fuera estudiada ni comentada»;

además, «en Constantinopla el poder central nunca garantizó un apoyo oficial a la investigación astronómica como sí sucedía en el mundo islámico»[17].

De hecho, no hay textos de Ptolomeo en griego medieval anteriores al siglo XIII; la cesura lingüística con el griego helenístico hablado siglos antes era sensible, y con el latín fue total después del año 610. En el año 830 el *basileus* tuvo que recurrir al docto irlandés Dicuil para hacer comprensibles las copias de las célebres *Tabulae* elaboradas por Castorio quinientos años antes. Comprender la esquematización de las que hoy conocemos como *Tabula Peutingeriana* debía de ser, como hemos dicho, un problema más conceptual y perceptivo que filológico.

Pese a los propósitos prácticos de la geografía en comparación con la astronomía, también en aquellos siglos se evidencia la dificultad a la hora de comprender un espacio apenas más vasto que lo perceptible o que exclusivamente el territorio conocido. El «dónde» es solo lo que está a la vista.

En su *Liber de mensura orbis terrae*, Dicuil demuestra conocer la distancia que hay, por ejemplo, entre Tréveris y Roma, pero solo sabe representar el mundo conocido de forma simbólica, forma que prevalece conceptualmente sobre la medición. Esta última es, en cierto sentido, irrelevante, dado que el espacio no es ni grande ni pequeño, sino a la medida del hombre, tal y como Dios ha querido.

En un elaborado mapa británico de los siglos XI-XII conocido como Planisferio de san Jerónimo, el cartógrafo, a pesar de sus evidentes conocimientos geográficos, tampoco aplica medidas, escala, proyección ni coordenadas; problemas matemáticos estos que, como hemos visto, habían preocupado a los geómetras árabes posptolemaicos. Valga una anécdota para todo el discurso: el cartógrafo anglonormando Mateo de París anotó en un bonito mapa: «Si el folio lo hubiera permitido, habría dibujado más lejos esta isla».

Y, sin embargo, cuando el monje Dicuil (más de tres siglos antes que París) compilaba su *De mensura*, el diseño en escala geométrica era conocido, como demuestra la precisión de la planta de los edificios del monasterio de San Galo del año 830. Pero posiblemente —esto es solo una hipótesis— la iglesia y el monasterio benedictino eran un pequeño espacio sagrado, es decir, ordenado y ordenable; otra cosa muy diferente era representar y medir el mundo entero, grande y terrible.

De entre los pueblos germánicos, los últimos en expandirse, procedentes de la gran confluencia que fue Escandinavia, fueron los vikingos. A diferencia de sus predecesores, que habían invadido la Romania continental por tierra, los vikingos se desplazaron por mar; no obstante, su propósito era el mismo que el de sus antecesores:

saquear. Gracias a la coyuntura climática favorable que se produjo en los siglos IX-X, los navegantes escandinavos penetraron en las cuencas fluviales occidentales del Atlántico Norte, avanzando en función de los vientos y de las corrientes estacionales y alcanzando las tierras del continente americano, que, sin embargo, no les parecieron lo suficientemente apetecibles como para afrontar los muchos peligros que entrañaba la navegación. Según algunos arqueólogos bálticos[18], utilizaban una especie de compás solar grabado en discos de madera. En cualquier caso, el vasto escenario geográfico de sus navegaciones no aportó nada a una visión más vasta del mundo (por no hablar del cielo).

La invasión danesa de Irlanda apagó las luces de conocimiento que todavía brillaban en los monasterios. Allí, en el año 995, un monje desconocido pudo compilar un último mapa del mundo conocido, en cuya esquina superior izquierda aparece dibujada por primera vez Islandia. El mapa es rectangular y orientado, y muestra una concepción cartográfica innovadora respecto a los mapas de la época en forma de T inscritos en un círculo. Podría haber sido prometedor, pero no le interesó a nadie.

# 5

## LA BAJA EDAD MEDIA (SIGLOS XI-XIV)

No es habitual considerar los primeros siglos del segundo milenio como una época especialmente culta. Sin embargo, las premisas cognoscitivas de la etapa fundacional del pensamiento occidental moderno, lo que llamamos Renacimiento, se establecen en esos tiempos convulsos. A través de estrechos canales, y después de arroyos, torrentes y ríos en crecida, al saber europeo llegan teorías y praxis, instrumentos de investigación y sistemas conceptuales. La mayor parte de este conocimiento proviene de la Antigüedad, volviendo a aflorar no como una reliquia filológica, sino como un nuevo descubrimiento que no se sabe bien cómo manejar por su vitalidad y porque anuncia novedades. Y, para seguir con la metáfora hidrográfica, este flujo de conocimientos se produce de una forma no regulada, provocando remolinos, aluviones, ciénagas y pantanos, hasta que se configure una vía de escape a través de la cual los sabios, y de forma especial los astrónomos europeos del siglo XVI, naveguen hacia los océanos de la investigación celeste.

Nos encontramos a finales del siglo X, cuando en el monasterio de Santa María de Ripoll, en la Cataluña colindante con la España morisca, se comienzan a traducir, o por lo menos a reunir, tratados árabes sobre la construcción de instrumentos astronómicos cuyo uso requería un gran conocimiento teórico. En 984 se halla documentada una carta en la que el papa Silvestre II (de nombre secular Gerberto de Aurillac) le pide al obispo de Gerona la copia de un texto de aritmética árabe de un no mejor identificado Josephus Hispanicus, probablemente un judío que sabía latín. El interés de Gerberto (el papa Silvestre II) se centraba en el uso del astrolabio, del que había oído hablar, instrumento innovador para quien quisiera ampliar los pobres conocimientos astronómicos de los cristianos, pero que exigía un gran conocimiento matemático. Vemos de inmediato el cúmulo de dificultades con el que se encontraban los occidentales para acceder a la sabiduría de los árabes —traducción, transliteración, introducción

de signos aritméticos y cifras numéricas desconocidas son las trabas que se interpondrán en el largo periodo de afluencia de conocimientos a Europa—.

El texto de Josephus Hispanicus presentaba ya el uso de las cifras arábigas; si es cierto que en 1025 en Lieja poseían un astrolabio, es razonable pensar que el uso del mismo, una exótica novedad, resultara muy enigmático.

De hecho, es necesario detenerse en un problema no irrelevante de la historia de la astronomía y sobre todo del aspecto del que queremos informar: la percepción de la dimensión del espacio celeste. Medidas, cálculos y distancias se expresan obviamente a través de cifras; por ello, la adopción del sistema arábigo vehiculaba unos valores (decimales, fracciones, potencias) que la notación romana no permitía expresar. El problema de la correcta adopción de las cifras árabes en lugar de las romanas surgió de inmediato. Hugo de Santalla, que vivió a caballo entre los siglos XI y XII y tradujo las tablas astronómicas de Al-Juarismi, optó por las cifras romanas consciente de la inexactitud que estas comportaban, afirmando que «la sabiduría es prerrogativa de unos pocos elegidos designados por Dios» y que la exactitud no es de este mundo. Quizá el diferente clima político influyera en la elección —ya no era la época del culto papa Silvestre II (Gerberto de Aurillac), sino la de Urbano II, el belicoso papa de la primera cruzada—.

Aplacados los vientos de guerra, Esteban de Pisa tradujo en 1115 el *Kitab al Malik* utilizando la originaria forma oriental de la numeración arábiga, distinta de la notación occidental, es decir, magrebí e hispánica, que se estaba mostrando útil en el cálculo mercantil con el uso práctico del ábaco; la forma de los signos aritméticos era ciertamente más precisa, pero paradójicamente ininteligible en el ambiente de los estudiosos, que todavía utilizaban las cifras romanas.

Después volveremos al ferviente clima mercantil pisano del siglo XII. Por ahora, baste recordar que fueron necesarias al menos otras tres generaciones para que Leonardo de Pisa, más conocido como Fibonacci, hijo del mercader Bonaccio, que comerciaba con el norte de África, confiriese una sistematicidad gráfica y un valor a las cifras árabes, publicando en 1202 el celebérrimo *Liber abbaci*. Sin embargo, «conviene señalar que el uso de las cifras de nuevo cuño fue desaprobado y combatido por quienes entonces detentaban el poder [por motivos ideológicos] y porque los nuevos caracteres, al no tener una forma bien definida como las cifras romanas, se prestaban al engaño y al fraude»[19]. Todavía en el año 1299 el Gobierno florentino confirmaba la prohibición de utilizar las cifras arábigas, pero quizá solo por odio a la genialidad pisana que las había difundido.

Esta digresión acerca del uso o la prohibición de los valores cuantitativos expresados con la notación árabe es solo para decir que

las numerosas traducciones de textos científicos astronómicos realizadas a lo largo del siglo XII pecaban cuando menos de imprecisión respecto a las fuentes árabes. Lo realmente importante era que Occidente se estaba reapropiando de forma gradual de una visión cosmológica perdida hacía medio milenio.

En 1143, se compilaron en latín en Pisa las tablas de uso del astrolabio y, en esos mismos años, Burgundio de Pisa fue enviado a Constantinopla para traducir del griego lo que pudiera encontrar de los estudios astronómicos alejandrinos. Sin embargo, como hemos dicho, en la capital bizantina se conservaba muy poco de esta materia; además, al promotor de la expedición científica, el emperador Federico I, llamado Barbarroja, le interesaban sobre todo los datos sobre las vías comerciales.

Más les sonrió la fortuna a quienes se dirigieron a poniente, buscando por la vía impracticable de las traducciones árabes y hebreas el antiguo conocimiento helenístico. La abadía de Cluny seguía, con sus establecimientos monásticos dotados de *scriptoria*, la reconquista cristiana de España, y, cuando la cultísima ciudad de Toledo fue tomada, Cluny organizó un auténtico programa de exploración, selección y traducción de los tesoros científicos conservados en la ciudad andalusí. Hasta allí había llegado Platón de Tívoli, que tradujo para Cluny los textos de Al-Battani y la obra dispersa del latino Ptolomeo. Platón de Tívoli murió en 1145 y, al año siguiente, Gerardo de Cremona fue enviado a su vez a Toledo. A él se debe la traducción y la divulgación europea del *Almagesto* de Ptolomeo. Gracias a él y sus colegas, el ordenado sistema geocéntrico fue propuesto de nuevo a los sabios europeos revestido de toda la *auctoritas* de la antigua ciencia alejandrina. El trabajo de Gerardo se prolongó hasta 1175, coordinando en Toledo un *studium* de filólogos de distintos países, lenguas y religiones que vertieron al latín los textos de un gran número de científicos árabes. Un acervo de conocimientos que fue acogido por la comunidad sapiencial de Occidente sin salvedades, si bien erosionó ligeramente las concepciones corrientes y extendidas. Supuso una apertura del «espacio mental», además de una visión más amplia del cielo.

El redescubierto sistema ptolemaico se presentaba como algo ordenado, perceptible y de fácil comprensión; proporcionaba la imagen de una estructura celeste jerárquica que se adaptaba perfectamente a la mentalidad del poder político y religioso; además, en un mundo atormentado por conflictos y enredos institucionales, dicha estructura resultaba tranquilizadora.

Del grupo de colegas de Gerardo formó parte el clérigo toledano Domingo Gundisalvo (*ca.* 1115-*post* 1190), más interesado en la organización del pensamiento de Aristóteles —vehiculado por la

traducción árabe de Averroes— que en cuestiones meramente científicas; con él el aristotelismo penetra gradualmente, no sin obstáculos, en la doctrina de la Iglesia.

En 1230, Miguel Escoto, protegido tanto por el papa como por el emperador, tradujo de forma exhaustiva a Averroes, así como el *De coelo* de Alpetragio (m. *ca.* 1204), considerando la cosmología de los aristotélicos como el sistema más adecuado a la religión cristiana. El averroísmo no era todavía dogma, pero iba camino de convertirse en una doctrina consolidada inhibidora de visiones divergentes. Sin embargo, la investigación, con todos sus límites, seguía siendo libre.

En la primera mitad del siglo sobresale otro británico, Roberto Grosseteste (1175-1253), obispo de Lincoln, que tradujo del griego los textos provenientes de Constantinopla en los decenios en los que el Imperio romano de Oriente era, de hecho, un feudo francés. Grosseteste fue el primero en comentar la *Física* de Aristóteles; aquí lo recordamos por haber defendido la primacía de la matemática dentro de las ciencias naturales y la importancia de poder expresar valores cuantitativos precisos, pues se daba cuenta de la falta de exactitud de tales valores, visible en las numerosas y discordantes traducciones que llegaban del árabe, del griego y del hebreo. Grosseteste debe ser recordado también por la importancia que concedió a la óptica y a las posibilidades experimentales que se derivarían de la observación celeste si esta llegaba a perfeccionarse. Por falta de instrumentos, tuvo que limitarse a observar la Luna, pero le bastó para hipotetizar, de forma inductiva, una similitud entre lo terrenal y lo celeste, que fue confirmada siglos después.

También en el ámbito anglonormando, así como en el franciscano, destaca la figura de Juan de Sacrobosco (1195-1256), *magister* en la Universidad de París. Divulgador del sistema ptolemaico, interesado concretamente en la esfericidad de los cuerpos celestes, fue el principal defensor del uso de las cifras árabes en los textos científicos («que a los mercaderes se les deje utilizar también las anotaciones latinas»), de la relación entre su uso y la operabilidad aritmética (los algoritmos), y de la comprobación de las mediciones geográficas y astronómicas. Con Sacrobosco la percepción del espacio terrestre y del vecino espacio celeste se volvió más correcta y sobre todo más compartida. La noción de la esfericidad de la Tierra y de los cielos que orbitan a su alrededor se popularizó, algo no trivial en una Europa donde los cartógrafos, como se ha dicho, seguían subiendo a las alturas para entender la forma del mundo.

Hermano y seguidor de ambos fue el franciscano Roger Bacon (*ca.* 1219/1220-*ca.* 1292), que aprendió del maestro de Lincoln la necesidad de experimentar con método; dado que en Europa empezaban a utilizarse lentes graduadas, incluyó la potencialidad de

tal ayuda, imaginando algo que habría podido ser el telescopio. Mucho más positiva para el progreso de los conocimientos de la época fue la seria petición que dirigió a los estudiosos de su tiempo para que aprendieran el árabe, evitando así las intermediaciones del griego y del hebreo, petición apoyada también por el mallorquín Ramon Llull (*ca*. 1232-1315/1316), contrario al averroísmo sometido a fines dogmáticos. Pensador ecléctico, su *Tratado de astronomía* fue descalificado como la «farsa de un mago». De hecho, el desorden editorial, las interpolaciones y las manipulaciones teológicas de los *scriptoria* monásticos —después de casi dos siglos de traducciones— corrían el riesgo de invalidar las fuentes, por mucho que este gran trabajo sea para nosotros señal de la vitalidad y apertura mental de la época. En un códice del siglo XIII conservado en la Biblioteca Palatina de Parma, que transmite en hebreo la única copia conocida de un texto astronómico de Al-Razi, el compilador comenta al margen: «¿Por qué la gente se fía de los charlatanes?».

No sabemos a quién se refería, pero en esos mismos decenios centrales del siglo XIII el pensamiento aristotélico resurgido en la traducción de Averroes podía ser utilizado, sobre todo en el ámbito dominico, como sistema teológico al que subordinar toda disciplina, incluida la investigación científica. Guillermo de Moerbeke —gran viajero, traductor de Arquímedes y de Juan Filópono del griego y autor de un estudio sobre la refracción de la luz, consciente de que la instrumentación óptica era fundamental para la exploración de los cielos— y Tomás de Aquino, dominico como Guillermo, fueron coetáneos y colaboradores, pero el primero era un docto religioso y el segundo fue un religioso que ambicionaba construir una doctrina.

Jacqueline Hamesse califica así en síntesis esta fecunda época de incorporación del saber antiguo: «En general conviene destacar el carácter teórico y libresco de la transmisión de los textos científicos […] mientras que la experimentación solo se desarrollaba gradualmente. A pesar de los contactos cada vez más frecuentes entre Oriente y Occidente, existía una profunda divergencia entre la teoría y la práctica. De esta forma tan especial de transmisión del saber nacerá gradualmente una ciencia occidental autóctona, cuando los intelectuales, alimentados de los textos de la ciencia griega y árabe, sean capaces de liberarse de las *auctoritates* para dedicarse a la elaboración de doctrinas personales, llegando a aunar armoniosamente teoría y práctica en la construcción de sus sistemas, producto de una reflexión original y de una experimentación personal»[20].

La Baja Edad Media es en realidad un periodo mucho más libre de las *auctoritates* de cuanto lo serán los siglos siguientes, porque la autoridad máxima, Aristóteles, aún no era considerada como tal. De

hecho, la Iglesia desautorizó en 1277 más de doscientas proposiciones aristotélicas, sobre todo en materia de filosofía natural. Hasta el siglo XVI el rígido sistema de pensamiento de Tomás de Aquino, cautamente beatificado en 1325 para incomodar a los franciscanos, no se convirtió en doctrina. Las «elaboraciones de doctrinas personales» deseadas por Hamesse eran entonces muy variadas, por lo general fantasiosas, y apenas tenían que ver con la construcción de un modelo científico.

Una de esas elaboraciones, por no decir elucubraciones, es digna de ser comentada; no por erudición, sino porque fue objeto de reflexión por parte de Galileo Galilei más de doscientos años después de haberse hecho pública.

Se trata de lo expuesto por Dante en los cantos II y III del *Paraíso*. El poeta se apresura a avisar al lector de que encontrará en sus versos algunas cosas difíciles de entender y alejadas de todo lo que se enseñaba habitualmente en la época; nos referimos a los conocimientos que las personas medianamente cultas de la época se transmitían a través del *Didascalicon* de Hugo de San Víctor.

Y es en materia astronómica en donde Dante se empeña a fondo y sorprende. Con una demostración de catóptrica de manual, explica el movimiento de la luz sobre los cuerpos reflectantes, que la Luna es en realidad un cuerpo sólido, corruptible y accidentado como la Tierra, y que la luz es una fuerza que no se dispersa con la distancia. Al fin y al cabo, el canto II es conocido como «el canto de la Luna».

Pero más interesante si cabe que el célebre experimento allí descrito es la continuación del discurso en el canto siguiente. En él se encuentra el verso «probando y volviendo a probar», convertido en proverbial para la Accademia del Cimento («Academia del Experimento»), que lo convirtió en su lema poco después de morir Galileo; está relacionado con la tesis de que, «detrás de los sentidos, la razón tiene cortas las alas». En suma, parece que Dante elogiaba el método empírico, en polémica con el mero racionalismo de otras escuelas de pensamiento de su época, como, por ejemplo, el tomismo (la sistematización del pensamiento de Tomás de Aquino).

Por lo demás, Dante nunca se aleja del modelo cósmico de las esferas geocéntricas que los sabios de su época aceptaban como evidencias, es decir, como derivadas de nuestra forma de ver, pertinentes al espacio experimentable. Pero ¿qué ocurre si salimos de este? Y aquí es donde realmente se entiende la advertencia inicial del poeta al lector para que sea cauto al seguir todo lo que está a punto de exponer, ya que en el Canto III del *Paraíso* lleva al lector fuera y más allá del espacio visible.

La siguiente visión no se proponía como modelo ni como una teoría científica en la acepción corriente del término; se trataba solo

de la intuición, con un gran alcance, de una mente enormemente abierta. Si más allá de los cielos, razona Dante, se encuentra el espacio infinito, imbuido del Dios infinito que irradia su esencia desde todos los puntos, en dicho espacio ya no tiene sentido el concepto de centro ni el de distancia, ni tampoco el de las tres dimensiones propias de la geometría euclidiana: «Todo el cielo es Paraíso».

Dante sale del cosmos, el espacio ordenado y comprensible del sistema ptolemaico, y acompaña al lector temerario en una concepción subversiva de lo que está más allá del cielo visible, ampliando el universo de forma desmesurada. En el ultraespacio ya no tiene sentido el «dónde». Obviamente nada de esto era afirmable o teorizable. La visión dantesca se movía en el terreno teológico; por otra parte, el lenguaje empleado era el místico y poético, donde todo se admite. Y, sin embargo, sigue sorprendiendo que a principios del siglo XIVpudiera concebirse tal visión. No tendría consecuencias, salvo hasta tres siglos después, en la lectura sorprendida, y perpleja, de Galileo[21].

# 6

## DE LA EDAD MEDIA A LA ÉPOCA COPERNICANA

Los últimos siglos de la Edad Media son considerados por lo general como un periodo de llamativos viajes y exploraciones en nuestro planeta, pero irrelevante para el avance en el conocimiento del cielo. No cabe duda de que las fabulosas empresas de Marco Polo en Oriente, las navegaciones hacia el océano Índico de los árabes y las de los reyes portugueses en torno a África, y más tarde por el Atlántico hasta las islas Azores se hallan más grabadas en nuestra memoria, y en la de los hombres de entonces, que las «conjeturas» de algunos pensadores.

Evidentemente, la difusión al final de la Edad Media de la conciencia de que nuestro planeta era mucho más grande de lo que había afirmado Ptolomeo no se debió a ninguna especulación científica ni a la rectificación de los cálculos geográficos posibilitada por un mayor dominio de las matemáticas. Se debió más bien a las empresas mercantiles, que se multiplicaban y ampliaban su radio de acción. Aparte de una favorable coyuntura climática, los viajeros de aquellos siglos disponían ya de un instrumento cómodo y seguro, la brújula magnética, cuyas características ya no ofrecían ningún misterio. Este instrumento ya había sido descrito en torno a 1270 por el científico y viajero Pierre de Maricourt, más conocido como Petrus Peregrinus, que no solo se había limitado a explicar su uso, sino que había justificado también su funcionamiento elaborando la teoría de los dos polos magnéticos, basada en la premisa de que la Tierra era una esfera en perenne rotación alrededor de un eje. A él se debe la denominación de polo norte y polo sur para aquellos lugares que, como los vientos, la cartografía medieval llamaba Bóreas y Austro.

Es posible que estas consideraciones interesaran relativamente poco a los caravaneros venecianos o a los navegantes como Ibn Battuta, que seguían explicando los itinerarios a través de referencias morfológicas y expresando las distancias en días o lunaciones.

Cuando, en pleno siglo XIV, los cartógrafos empezaron a convertir las «noticias de viaje» en representaciones gráficas, se volvieron a

plantear las cuestiones relativas a los signos y medidas convencionales, a la orientación del dibujo, a las rejillas longitudinales, etc. ¿Cómo podían mejorar los mapas de los siglos anteriores, que los datos suministrados por los viajeros iban desmintiendo progresivamente? ¿Cómo podían encontrar valores y medidas compartidos y conformes con los *auctores*?

Como consecuencia de la convocatoria de un concilio ecuménico para volver a unir la Iglesia de Roma con la de Constantinopla, llegaron a Florencia mapas desconocidos, traídos por los griegos, que debió de estudiar Paolo dal Pozzo Toscanelli (1397-1482), gracias a su amistad con el cardenal Nicolás de Cusa, organizador del concilio. Sin embargo, también el matemático florentino, pese a su relación con una mente tan abierta como la del Cusano, debía de estar sometido a una especie de censura intelectual. Toscanelli no conocía los cálculos desaparecidos de Eratóstenes; no cometió, por tanto, un error de cálculo al indicar que podía llegarse por el oeste a las Indias a través de una breve travesía, sino que se encontró ante unos resultados irreconciliables con la «capacidad de concebir» el volumen de la esfera terrestre con unas dimensiones tan amplias. Feliz error, suele decirse, porque si Colón hubiera tenido los datos correctos posiblemente no se habría embarcado en la empresa.

Con respecto al espacio de nuestro minúsculo planeta, el final de la Edad Media fue, por tanto, una época de progreso. La conciencia empírica de que la Tierra era más grande de lo que los *auctores* habían transmitido precedió a su medición y su representación formal.

En contraste, en los siglos XIV y XV la observación del espacio celeste pareció detenerse por un evidente déficit de instrumentación óptica, tanto es así que ha llegado a ponerse en duda que en aquella época se efectuaran observaciones celestes, como es el caso del historiador Emmanuel Poulle). En realidad, los antiguos y los nuevos instrumentos, es decir, la esfera armilar, el astrolabio y el gnomon, se utilizaban plenamente tanto en Occidente como en Oriente Próximo. Hay constancia del uso de los *traguardi* (término que literalmente significan «para mirar a través de»), consistentes en unas astas paralelas y forradas que materializaban el rayo óptico, la luz de un astro, y permitían calibrar el desplazamiento de la fuente de luz respecto al observador fijo. Además, el uso del cuadrante se volvió cada vez más exacto; es el instrumento que vemos en manos del barbudo «matemático» representado en el *campanile* de Giotto en Florencia, que data como mucho de mediados del siglo XIV. Dicho uso conducirá al diseño de los instrumentos que Tycho Brahe describió después en su *Astronomiae instauratae mechanica*, de 1598, apenas un perfeccionamiento del cuadrante que aparece representado en el bajorrelieve de Giotto al que nos acabamos de referir. Brahe debe ser

considerado, por su cantidad de observaciones astronómicas, volumen de datos recogidos y atención a la exactitud de los mismos, uno de los astrónomos más eminentes «a simple vista». Inventa, construye y ordena construir en el observatorio de Uraniborg primero y luego en el de Stjerneborg (término este que significa «castillo de estrellas») (ambos observatorios en la isla danesa de Ven) una serie de instrumentos que ofrecían la posibilidad de hacer mediciones astronómicas cada vez más exactas. Dichos instrumentos permitían estudiar la posición y el movimiento de los astros; por su abundancia y precisión, los datos de Brahe contenían ya la semilla para una potencial revisión del sistema cosmológico.

En el siglo XIV la invención más importante realizada con instrumentos es la atribuida a Levi ben Gershon (1288-1344), más conocido como Gersónides. En 1342, este gran pensador vio traducida al latín y publicada su obra sobre astronomía por deseo del papa de Aviñón Clemente VI. En ella presenta un instrumento conocido como ballestilla y que él denomina «vara de Jacob»[22], un objeto sencillo de concepción geométrica, no óptica, como había sido el nocturlabio o sería el telescopio. La ballestilla servía para medir la diferencia angular entre las posiciones de los astros, permitiendo al observador prescindir de la referencia del plano horizontal, aquel en el que el astrónomo apoya los pies. Anticipándose a la construcción del vernier o calibrador, Gersónides trató además de mejorar la exactitud de la lectura de las graduaciones, trazando en el instrumento unas líneas oblicuas transversales que, generalizadas casi tres siglos después por Tycho Brahe, siempre atento a todo lo que pudiera mejorar la exactitud de las medidas, recibieron el nombre de líneas ticónicas. El concepto fue después elaborado por Pierre Vernier y condujo a la introducción del nonio, dispositivo para calcular fracciones de la unidad de medida.

De mayor relieve si cabe son los avanzadísimos cálculos matemáticos del rabino francés y las consecuencias que supo extraer de ellos. Gersónides llegó a considerar que las estrellas no yacían en una única esfera móvil, como sostenía el modelo ptolemaico, sino que se encontraban a distancias 10.000 millones de veces mayores (alrededor de cien años luz en unidades modernas). El científico medieval aplicó de manera consciente y sistemática la inducción matemática, como haría también Galileo, combinándola con la observación, con todo lo que le era posible observar a simple vista. Cotejando los cambios advertidos en la luminosidad aparente de Marte con los previstos por el modelo ptolemaico de los epiciclos, Gersónides llegó a percatarse de las contradicciones de dicho modelo y trató en vano de mejorarlo. Fue notable su planteamiento de no considerar la cosmología corriente como dogma, sino como una teoría

comprobable experimentalmente. Sus razonamientos se difundieron en pleno siglo XIV sin que la Iglesia pusiera impedimento alguno.

¿Por qué entonces el progreso de conocimiento, de método, de percepción de la vastedad del cosmos al que llegó Levi ben Gershon permaneció oculto? Probablemente a causa de una coyuntura política desfavorable, donde las conquistas del científico se situaron en la parte equivocada del campo de juego. Al poco tiempo, el catolicismo se dividió entre los partidarios de Aviñón y los partidarios de Roma, y Levi había sido apoyado por el clero de Aviñón. El proyecto que consiguió el regreso del papado a Roma se hallaba fuertemente respaldado por los dominicos, que basaban sus certezas en el esquema conceptual tomístico, o sea, neoaristotélico, bien anclado en la cosmología ptolemaica. No era el momento de confirmar dudas y novedades; había que unirse más bien en torno a visiones esquemáticas y seguras. ¡Según los tomistas no había que prestar atención a los pretenciosos y vanos discursos matemáticos de un hebreo proveniente de una escuela talmúdica!

El siglo XV fue la magnífica forja del pensamiento occidental. Si se ha escrito hasta aquí sobre los progresos de la cartografía, es decir, de la representación gráfica del espacio terrestre, no se puede dejar de destacar también la gran contribución de la matemática a las artes figurativas y la arquitectura.

El toscano Luca Pacioli (1445-1517), considerado el matemático más relevante de la época, tuvo una gran importancia para los artistas de su tiempo. Sus estudios de antropología, de geometría sólida y de la relación (la divina proporción) entre representación plana y efecto tridimensional estuvieron en la base de resultados pictóricos hasta entonces imposibles; uno de ellos fue el cimborrio pintado por Bramante en la iglesia de Santa Maria presso San Satiro de Milán. La iglesia, en forma de T, le parece al visitante mucho más profunda de lo que es, como si la planta tuviera forma de cruz latina. Los efectos de perspectiva tuvieron múltiples aplicaciones, tanto en la pintura mural como sobre tabla, y uno de los resultados fue la invención de la escenografía del naciente teatro moderno, la cual sería el equivalente a los actuales «efectos especiales».

La importancia del punto de vista y del cálculo del punto de fuga para el artista que deseara empeñarse a fondo condujo en los siglos posteriores a auténticos virtuosismos con la perspectiva, como el efecto trampantojo, donde las técnicas de coloreado y sombreado son rígidamente sometidas a reglas matemáticas y geométricas. Todo esto habría quedado únicamente en un juego asombroso realizado por hábiles ilusionistas si la reflexión sobre la importancia del punto de vista no hubiera influido a su vez en el pensamiento matemático, lo mismo que la observación astronómica. En pleno siglo XVII, el genio

multifacético de Juan Caramuel (1606-1682), que reflexionó tanto sobre los planetas mediceos como sobre la manera de proyectar escaleras elípticas, escaleras de mármol con balaustradas, formuló el concepto «arquitectura oblicua», o sea, de cómo los objetos tridimensionales para ser percibidos correctamente por nuestro ojo, es decir, descodificados por nuestro cerebro, deben estar configurados en un «espacio oblicuo».

Es lo que llevará a buen término Maurits Escher en el siglo XX, con sus construcciones imposibles, que desestabilizan el sistema perceptivo del espacio representado.

A lo largo del siglo XV, personajes con una relevancia muy diferente a la del docto y genial rabino Gersónides retomarían la revolucionaria idea del sistema heliocéntrico, así como la subversiva y dificultosa, incluso inaceptable por el vértigo que producía, de la no finitud del universo. Y con ella la consecuencia de no poderlo entender más que por aproximación, o sea, por lo que está muy próximo a nosotros. De hecho, muy poco.

La mente de la que surgió esta «conjetura» fue la de un alemán conocido como Nicolás de Cusa (Cusa, Tréveris, 1401-Todi, 1464). Su polifacética vida influyó en su pensamiento; fue hombre de Iglesia en las esferas más altas, diplomático, estratega militar, unas veces ecuménico y conciliar, y otras perseguidor de herejes e infieles, siempre a mayor gloria de Roma; matemático y astrónomo militante, filósofo por vocación y político por oficio, en suma, un perfecto humanista. La perspectiva cosmológica del cardenal de Cusa refleja un poco todo esto, por lo cual solo podía estar totalmente en contra del esquema limitado y limitante del averroísmo. En síntesis, el Cusano sostenía que la Tierra gira sobre sí misma y alrededor del Sol, la cual es una más de las innumerables estrellas; y hasta aquí repetía una idea que, como hemos visto, se venía proponiendo desde la Antigüedad y siempre era rebatida por ser contraria a la «evidencia». Sin embargo, el Cusano no se limitó a volver a proponer el sistema heliocéntrico, que es al fin y al cabo lo próximo a nosotros. El sistema solar fue solo la premisa para concebir un universo que no es finito ni infinito, sino que simplemente no está sujeto a categorías «geométricas» como centro, distancia, medida, forma, etc. La visión de Nicolás de Cusa se parece mucho a la de Dante, quien partía, no obstante, de consideraciones ideológicas envueltas en un lenguaje poético algo visionario, si no alucinatorio. Al no disponer obviamente de instrumentos de observación óptica, el Cusano intentó demostrar matemáticamente su sistema de pensamiento. Sin embargo, se dio cuenta de que la instrumentación matemática podía funcionar para los astros más cercanos, pero que más allá de ellos solo se podía llegar por

«conjetura».

Como solo podía comprobar por sí mismo una pequeña parte de lo que afirmaba, el Cusano introdujo en el método de investigación la «conjetura» en lugar del «concepto», de origen griego. Y en este rendirse a la imposibilidad de la comprobación cosmológica sin renunciar a razonar acerca de ella radica el mayor mérito de su pensamiento. Pensamiento subversivo, pero que no podía ser eliminado ni descalificado por sus contemporáneos como había sucedido con el hebreo Gersónides. En el caso de Cusa se trataba de un príncipe de la Iglesia que había estado al frente del papado de forma interina a la muerte de Eugenio IV. ¿Cómo reaccionó la comunidad intelectual de la época? ¿Qué efectos podía tener sobre la doctrina de la Iglesia tal subversión? Hay que tener en cuenta que la Iglesia del siglo XV, regida por pontífices humanistas o mundanos, les dejaba las disputas ideológicas internas a las diferentes escuelas de pensamiento y era, como lo fue fundamentalmente durante toda la Edad Media, mucho menos dogmática de lo que sería en el siglo siguiente. En el caso que nos ocupa, la mentalidad diplomática del Cusano prevaleció sobre el espíritu investigador. Su pensamiento estaba «reservado», o sea, destinado, al estrecho círculo de filósofos y científicos que pudieran profundizar en el tema. Hubo quienes discreparon de él, como Marsilio Ficino, Pico della Mirandola o Pietro Pomponazzi. En estos se reconoce el esfuerzo de conciliar el saber de los antiguos con las hipótesis de renovación global de la astronomía, pero con una especie de resistencia mental a favor de la autoridad de los primeros, y casi con sobrecogimiento ante concepciones, como la de Nicolás de Cusa, que consideraban nuestro planeta como un astro periférico en un universo agigantado hasta lo inimaginable.

Mientras tanto, era nuestro planeta el que se iba ampliando, pero de forma demostrada, medible y posiblemente representable. En la última década del siglo XV y la primera del XVI, las empresas de los navegantes contaron con cartógrafos mucho mejor preparados que los de los viajes a Oriente de Marco Polo o los de los misioneros franciscanos de los siglos XIII y XIV. La matemática y la geometría, unidas al formidable y nuevo instrumento de la imprenta, permitieron en 1507 a Martin Waldseemüller publicar una tirada de mil ejemplares de una representación de todo el globo terráqueo a la luz de los descubrimientos geográficos atesorados a lo largo de los siglos y que recientemente habían remodelado la imagen y la medida del mundo. La única copia que se conserva de la *Universalis cosmographia*, donde aparece por primera vez el nombre «América», se puede explorar hoy en una página web[23] y permite hacerse perfectamente a la idea de cómo el dibujo del mundo, a principios del siglo XVI, no era solo un admirable ejercicio cartográfico, sino una declaración de

apertura mental hacia un «dónde» cada vez más vasto. Conscientemente más vasto.

En la siguiente generación, quienes recogieron el legado de Nicolás de Cusa fueron, no sin motivo, los protofísicos, que dentro de la praxis experimental distinguían entre conjeturar y propugnar teorías. Fue, por tanto, un médico —o sea, un empírico, como decían los filósofos con mucha pomposidad— llamado Girolamo Fracastoro (1478-1553) el que intentó afianzar una nueva visión del cosmos. Alumno de Pomponazzi en Padua, Fracastoro se alejó de su maestro, sobre todo en lo referente a la observación astronómica, campo de investigación que seguía careciendo de una instrumentación operativa. En 1538 publicó su proyecto para la construcción de un telescopio, objeto que sería realizado por Galileo más de setenta años después precisamente en Padua.

También en Padua, Fracastoro conoció a un eclesiástico polaco, Nicolás Copérnico (1473-1543), algo mayor que él. El estudiante polaco acababa de regresar de Ferrara, donde se había iniciado en los estudios astronómicos con Domenico Novara; pero Copérnico no se sentía tan atraído por las ambiciones experimentales y por la observación celeste —imprescindibles para Fracastoro— como por las concepciones pitagóricas: *Mathemata mathematicis scribuntur*, es decir, si el movimiento de los astros es una función matemática, ha de ser explicado mediante el lenguaje matemático.

La cauta toma de posición de Copérnico se encuadraba en una tradición especulativa totalmente aceptable para la época. Habiendo regresado a Silesia (en la actual Polonia), en la segunda década del siglo XVI redactó probablemente el primer borrador del *De revolutionibus orbium coelestium*, o al menos de la obra que sería impresa póstumamente con ese título. Título afortunado que se refería al movimiento de los planetas alrededor del Sol, pero que pasó a la historia como una «revolución» cosmológica. Sin embargo, como hemos visto, la concepción heliocéntrica había ido de la mano de la concepción geocéntrica desde la Antigüedad, por lo que la idea no era ninguna novedad. Copérnico demostró, no obstante, que el sistema geocéntrico estaba matemáticamente equivocado y que el heliocéntrico era irrefutable. Basándose en Heráclides Póntico (siglo IV a. C.) estableció la correcta relación entre la velocidad de los planetas y su distancia al Sol. Como afirma el historiador Alfonso Ingegno, «la falta de un paralaje de las estrellas fijas obliga a Copérnico a establecer una enorme distancia entre ellas y Saturno [el último planeta observable a simple vista], lo cual pone en tela de juicio la regularidad armoniosa del cosmos. Esto obliga a Copérnico a hablar de un universo inmenso, desde el momento en que la última esfera, tan ampliada en sus dimensiones, ya no responde a ninguna

función física real»[24].

El clérigo polaco había dedicado su obra más famosa al papa Pablo III. Por lo demás, el planteamiento teórico no afectó demasiado a la ortodoxia de la Iglesia del siglo XVI, enfrentada a unos conflictos teológicos y políticos mucho más graves y desgarradores. Los defensores de la consolidada cosmología ptolemaica se situaron imparcialmente entre los católicos y los reformistas. De hecho, los más extremistas de estos últimos fueron los anabaptistas, que vieron en el pensamiento copernicano una obra diabólica. En cambio, el mucho más versado cardenal Belarmino, el histórico adversario de Galileo, no encontró nada herético en el texto de Copérnico. La obra se había publicado en 1543, poco antes de la muerte del autor, cuando el Concilio de Trento todavía no había cerrado las puertas de la investigación científica a toda visión que no se atuviera al petrificado neoaristotelismo. La segunda edición se publicó en Basilea en 1566, en pleno territorio reformado. Una vez más, la libertad de investigación se convirtió en un lujo que la Iglesia de la Contrarreforma, en el marasmo de cismas y guerras de religión, no podía permitirse. La coyuntura política —negativa para una serena aceptación de la cosmología de Copérnico, de un universo tan vasto como armónico por proyecto divino— empeoró con la adhesión al heliocentrismo de espíritus rebeldes e imaginativos como Giordano Bruno y Tommaso Campanella, que tenían muy poco que ver con el método científico. Hasta 1609 el *De revolutionibus orbium coelestium* no se incluyó en el *Índice de libros prohibidos*, junto a muchos fragmentos de la *Divina comedia* de Dante, y seguramente más por prudencia política que por desacuerdo científico.

Decíamos que los datos de Brahe contenían ya la simiente para un cambio de paradigma. Afortunadamente se los legó a Kepler (1571-1630), su genial colaborador y sucesor. Recordemos que los dos científicos se movían en terreno reformado, totalmente obstaculizado por los poderes católicos. Kepler, analizando y elaborando los datos de Brahe y los suyos propios, llegaría al convencimiento de que es matemáticamente imposible que el Sol no se encuentre en el centro del sistema planetario, y demostraría que las órbitas de los planetas son elípticas y no circulares (primera ley de Kepler, 1608).

Notables son también las implicaciones de su segunda ley, formulada al año siguiente, cuando Galileo apuntó el telescopio hacia el cielo: las velocidades angulares de los planetas no son constantes, sino máximas cuando el planeta se encuentra cerca del Sol, como si de este emanara una misteriosa fuerza central que actúa sobre ellos y que es más fuerte cuanto más cerca están los planetas de él.

Es significativo el hecho de que Brahe y Kepler fueran testigos de la explosión de dos supernovas de nuestra galaxia, observables a

simple vista durante meses. Desde entonces ninguna estrella de nuestra galaxia ha explotado en una supernova lo suficientemente brillante para ser observable a simple vista.

La primera, que conocemos como supernova de Tycho, explotó en 1572; en aquella época Kepler estaba a punto de cumplir un año; la segunda, la supernova de Kepler, estalló en 1604; Brahe había muerto hacía tres años. Si los tiempos políticos eran adversos, los tiempos de la razón estaban ya maduros e inducían a abandonar un cosmos perfecto e inmutable; otras mentes geniales nos acompañarían ya no «a las puertas de casa», sino a un buen paseo fuera de la misma. Y no se detendrían allí.

# 7

## A LA PUERTA DE CASA Y UN POCO MÁS ALLÁ

Somos exploradores inquietos e interesados, o al menos lo es esa minoría del género humano que hace historia. Tratamos continuamente de ensanchar nuestros horizontes, de descubrir qué hay al otro lado de una montaña, al otro lado de un océano.

Lo hacemos por un interés económico, cultural y científico. Lo hacemos para encontrar nuevas tierras, nuevos mercados, nuevas oportunidades; para asegurar situaciones ventajosas y también por curiosidad. Se dice que a la pregunta «¿Para qué escalar el Everest?», George Mallory respondió: «Porque está ahí». Lo intentó en 1924, veintinueve años antes que Hillary, pero no lo consiguió; su cuerpo fue encontrado en 1999 a pocos centenares de metros de la cima.

Después de haber explorado gran parte de nuestro planeta y en cuanto hemos tenido los medios para hacerlo, hemos empezado a explorar sus alrededores, aventurándonos en nuestro sistema solar. Pequeño, casi irrelevante comparado con toda la galaxia que nos alberga —un conglomerado de algunos cientos de miles de millones de estrellas—, es, sin embargo, enorme comparado con nuestro planeta. De acuerdo, pero ¿qué tamaño tiene el sistema solar? ¿Y en qué medida lo hemos explorado? Hasta los últimos años del siglo XVIII llegaba a incluir a Saturno, el planeta más lejano entonces conocido. Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno siempre han sido observables a simple vista, sobre todo cuando los cielos estaban en todas partes mucho más oscuros que hoy. Su luz estable y sobre todo su movimiento —extraño pero regular respecto a las estrellas fijas— permitieron clasificarlos como planetas desde la Antigüedad. Y durante milenios han sido todo el sistema solar conocido, ya fuera geocéntrico o heliocéntrico, conocido antes incluso de que se calcularan correctamente las distancias que mediaban entre los planetas y entre estos y el Sol.

Un ojo muy experto y atento, unido a una mente despierta y sistemática, habría podido, en cualquier momento, extender los confines hasta Urano, que con una magnitud aparente de alrededor de

5,5 magnitudes (varía entre 5,3 y 5,9) es observable a simple vista, si bien con cierta dificultad. La «magnitud» de un objeto celeste es una cifra que indica la medida, en escala logarítmica, de su brillo tal y como es visto por un observador desde la Tierra. Un objeto celeste de magnitud 5 es dos veces y media más brillante que un objeto de magnitud 6, que a su vez es dos veces y media más brillante que uno de magnitud 7. A simple vista, en una noche clara de luna llena y desde un lugar oscuro, se consiguen ver estrellas de hasta magnitud 6, por lo que Urano habría podido ser identificado como planeta ya desde la Antigüedad. Sin embargo, no fue así, probablemente porque su movimiento aparente es mucho más lento que el de los demás planetas más cercanos a nosotros. Ni siquiera Galileo (1564-1642), el primero en mirar el cielo con un telescopio, consiguió ampliar los confines del sistema solar. No obstante, logró enriquecerlo debido a su descubrimiento de los cuatro satélites principales de Júpiter (Ío, Europa, Ganimedes y Calisto), y de la extraña forma de Saturno, que a él le parecía alargado, como si tuviera dos manillas. El primero en describir a Saturno con sus anillos fue Huygens en 1655; Galileo había muerto hacía trece años.

Gracias a su telescopio, Galileo habría podido, por tanto, ampliar, y mucho, los confines del sistema solar, sobre todo con el descubrimiento de Neptuno. Habría sido un gran triunfo, pero la suerte no le sonrió. De hecho, hubo quien afirmó[25] que estuvo muy cerca de conseguirlo. El 28 de diciembre de 1612, Galileo observó en dos momentos diferentes la parte del cielo donde se encontraban Júpiter y sus satélites, y recogió, en los dibujos que nos han llegado, la presencia de otro astro, que estaba en la posición en la que sabemos que se encontraba Neptuno en aquella época. Pero justamente aquel día el planeta comenzaba su aparente movimiento retrógrado y se movía, por tanto, muy lentamente, demasiado como para que Galileo pudiera notar el desplazamiento con su pequeño telescopio. Después, en enero de 1613, hizo otra anotación de la observación de Neptuno, documentada también en sus dibujos, y posiblemente otra de un cambio de posición. Galileo debía de tener una inteligencia muy despierta y la mirada atenta. Es posible que tuviera dudas y que se prometiera a sí mismo posteriores observaciones de las que, sin embargo, no tenemos datos. Quizá no contara con condiciones meteorológicas favorables. Después, Neptuno se alejó tanto de Júpiter que no se le podía encontrar.

La primera ampliación oficial del sistema solar no tuvo lugar, por tanto, hasta 1781, cuando William Herschel (1738-1822), buscando estrellas dobles, descubrió casualmente a Urano. Observando su movimiento respecto a las estrellas fijas, al principio pensó que había descubierto un cometa, pero sucesivas mediciones de la órbita de este

objeto celeste mostraron su casi circularidad, típica de los demás planetas, y no la marcada excentricidad que se hubiera esperado de un cometa. Al pedirle que bautizara a este nuevo planeta, exterior a la órbita de Saturno, Herschel sugirió, posiblemente por intereses personales, llamarlo Georgium Sidus, en honor del rey Jorge III de Inglaterra, que, en reconocimiento por su importante descubrimiento científico, le asignó un sueldo anual de 200 libras esterlinas, a condición de que se trasladara con su telescopio a Windsor, para que la familia real pudiera observar de vez en cuando los astros. Sin embargo, el nombre de Georgium Sidus no cuajó, y el astrónomo alemán Johann Bode propuso llamar Urano al nuevo planeta —padre de Saturno en la mitología griega— siguiendo la línea genealógica con los dos planetas anteriores, ya que Saturno es a su vez el padre de Júpiter. En aquella época el nombre de Urano debía de gustar bastante, tanto es así que fue también adoptado para el nonagésimo segundo elemento (el uranio justamente) de la tabla periódica, descubierto por Klaproth en 1789. Tuvo que pasar algún tiempo para que el nombre «Urano» empezara a utilizarse de forma universal, lo que ocurrió a partir de 1850, pocos años después del descubrimiento de Neptuno, en 1846.

Con la incorporación de un nuevo planeta exterior a los ya conocidos, y en vista de que Urano orbita a 20 unidades astronómicas (UA) del Sol —Saturno lo hace a 10—, las dimensiones lineales del sistema solar se duplicaron y aumentaron posteriormente con el descubrimiento de Neptuno, situado aún más lejos (a 30 UA del Sol)[26]. El descubrimiento de Neptuno puede ser considerado uno de los triunfos de la mecánica celeste newtoniana. Se dedujo su existencia a partir de las repetidamente observadas y estudiadas perturbaciones de la órbita de Urano. Urbain Le Verrier (1811-1877), astrónomo francés, cotejando las posiciones previstas para Urano con las ya observadas, llegó a la conclusión de que había otro planeta situado más allá de la órbita de Urano, que con su atracción gravitacional alteraba la órbita de este. Le Verrier calculó, por tanto, la posición teórica de este planeta desconocido y se la envió al astrónomo Johann Galle (1812-1910), que trabajaba en el observatorio de Berlín, animándolo a realizar observaciones de la región celeste en la que estaba seguro de que debía de encontrarse el octavo planeta del sistema solar. Comparando una imagen obtenida el 23 de septiembre de 1846 con todo lo que había sido registrado anteriormente, Galle pudo identificar a Neptuno como una débil señal luminosa que se había desplazado —por lo tanto, un planeta— respecto a la posición de las estrellas fijas. Las dimensiones del sistema solar aumentaban así todavía más. Pronto fue el turno de Plutón, buscado durante mucho tiempo —siempre a través de las perturbaciones de la órbita de Urano, que en un análisis

más exhaustivo no quedaron totalmente explicadas por la presencia de Neptuno— y descubierto en 1930 por Clyde Tombaugh (1906-1997). Considerado al principio como el noveno planeta del Sistema Solar, Plutón fue reclasificado en 2006 por la asamblea de la Unión Astronómica Internacional, no sin polémicas, como planeta enano, junto a otros cuerpos del sistema solar descubiertos posteriormente (Eris, Sedna y Quaoar, entre otros).

La idea de que el sistema solar acababa en la zona de Plutón pronto fue superada. Plutón, que por otra parte tiene una órbita mucho más elíptica que los demás planetas —su perihelio está a 30 UA, y su afelio a casi 50—, no es más que la avanzadilla de una miríada de cuerpos menores, de los que es el segundo en tamaño, y de «transneptunianos», cuerpos compuestos de hielo y polvo que forman el cinturón de Kuiper, descubierto en 1992. Pero entonces, ¿cómo es de grande nuestro sistema solar y dónde acaba?

Si lo definimos como la zona del espacio donde aún se perciben los efectos del viento solar, un flujo de plasma, sobre todo electrones y protones, emitido por la parte superior de la atmósfera del Sol, entonces tenemos razones de peso para sostener que se limita a 120-130 UA aproximadamente. Por consiguiente, es diez veces más extenso, linealmente, de lo que se pensaba cuando Saturno era el último planeta conocido. ¿Cómo lo sabemos? Nos lo dijeron en 2013 los científicos de la NASA cuando anunciaron que los instrumentos de la Voyager 1 señalaban que esta había «salido» del sistema solar y ahora navegaba en el espacio interestelar.

En el portal de internet dedicado a la misión[27] se pueden encontrar interesantes noticias sobre esta sonda que, lanzada en 1977 rumbo a Júpiter y Saturno, superó también las órbitas de Urano y Neptuno y, en octubre de 2016, se encontraba a más de 20.000 millones de kilómetros del Sol, a 136 UA aproximadamente. La distancia de la sonda a la Tierra se actualiza en tiempo real y es tanta que para transmitir una orden y comprobar su eficacia hay que esperar treinta y ocho horas —el tiempo que tarda en ir y volver de la Tierra a la sonda a la velocidad de la luz—.

Si, en cambio, definimos el sistema solar como el volumen que contiene a los objetos unidos gravitacionalmente al Sol, es decir, que orbitan alrededor de nuestra estrella, podríamos llevarnos grandes sorpresas. A una distancia comprendida entre 50.000 y 100.000 UA, se encuentra la nube de Oort, una nube de muchos «miles de millones» de cuerpos, compuestos de hielo, metano, monóxido de carbono y otros elementos, que probablemente constituyen lo que queda del disco protoplanetario donde se originó el sistema solar. Se trata de núcleos inertes de cometas, de los que se piensa que provienen los cometas de ciclo largo, con una órbita superior a doscientos años,

cuando, por efecto de alguna perturbación gravitacional, son lanzados dentro del sistema solar. Al acercarse al Sol se «encienden», mostrando la cola. Es muy probable que por ejemplo el cometa Hale-Bopp, uno de los más luminosos de los últimos decenios, que adornó el cielo nocturno en 1997, se originara en la nube de Oort. Con una órbita calculada de 2.534 años, está previsto que nos vuelva a visitar en el año 4380.

Así pues, nuestro sistema solar, que en un principio se pensaba que solo contenía un puñado de planetas confinados dentro de la órbita de Saturno, situados a lo largo de un disco relativamente fino, ha seguido aumentando, volviéndose en los últimos tres siglos inconmensurablemente mayor en sus tres dimensiones. De hecho, tras llegar a la nube de Oort, hemos recorrido 50.000 UA (equivalentes a 7,5 × 1012 km), algo menos, por tanto, de un año luz (que equivale a 9,5 × 1012 km), una buena parte de la distancia que nos separa de la estrella más cercana a nosotros, Próxima Centauri, que se encuentra a 4,2 años luz del Sol.

Nuestro sistema solar es un campo de investigación donde han tenido lugar dos importantes cambios: en primer lugar, la astronomía de observación se ha vuelto «experimental» y, en segundo lugar, multidisciplinar, ya que ahora geólogos, meteorólogos, químicos y biólogos colaboran en el estudio de los planetas. Entender los volcanes de Ío, las tormentas de Júpiter, los glaciares de Europa, la atmósfera de Venus y los cañones de Marte requiere, en efecto, otros conocimientos además de los astronómicos. A partir de los años setenta del siglo pasado, el estudio de los planetas se ha convertido en un magnífico terreno multidisciplinar donde diversas competencias se encuentran y se integran. De hecho, en lo que se refiere a nuestros compañeros de rotación alrededor del Sol —y también a sus lunas, algunos asteroides mayores y algunos cometas—, ya es una práctica consolidada ir a recoger los datos directamente *in situ*. Se trata de un enfoque nuevo y diferente para los astrónomos, que, obligados durante siglos a observar desde lejos, solo han podido, como niños bien educados, «mirar sin tocar». Sin embargo, en los últimos decenios, al menos en lo que se refiere a nuestro sistema solar, también han aprendido a «tocar».

En primer lugar, tocaron la Luna en 1959 con Luna 2, que se estrelló en la superficie de nuestro satélite. Hubo que esperar a 1966 para que Luna 9 realizara un «toque» cuidadoso, un alunizaje suave, demostrándose así que era posible aterrizar en su superficie sin hundirse en una espesa capa de polvo, como algunos temían. En 1971, las sondas soviéticas Mars 2 y Mars 3 tocaron Marte, la primera impactando, y la segunda, con un aterrizaje suave. Ya en 1965, la sonda americana Mariner 4 había fotografiado este planeta,

mostrando un planeta árido y desértico, y poniendo fin a hipótesis y rumores sobre la existencia de vida en él, originados por las observaciones de Schiaparelli (1835-1910) sobre los famosos «canales». El primer aterrizaje suave sobre la superficie especialmente inhóspita de Venus lo realizó la sonda soviética Venera 9 en 1975. A partir de los años sesenta y setenta del pasado siglo hemos poblado el sistema solar con una miríada de sondas, que han visitado y visitan los distintos planetas y sus lunas, los cometas y los asteroides, para estudiar sus propiedades de forma detallada. Como no podemos traer los planetas a los laboratorios, hemos llevado nuestros laboratorios a ellos, a semejanza de lo que se hizo con vegetales y animales en las exploraciones geográficas realizadas entre los siglos XVI y XX. Hemos visitado con la sonda Giotto el cometa Halley y el cometa Grigg-Skjellerup, y nos hemos posado con la japonesa Hayabusa en el asteroide Itokawa, tomando algunas muestras minúsculas y trayéndolas a la Tierra. Hemos lanzado en paracaídas una sonda a Titán (satélite de Saturno) y hacemos que una pequeña flota de vehículos-robot circule por Marte. Hemos molestado al cometa Tempel 1 disparándole un proyectil de más de 300 kg y perforado el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. New Horizons nos ha enviado fotografías de la superficie de Plutón y ahora se dirige, a una velocidad de 52.000 km/h, hacia el cinturón de Kuiper para encontrarse con el objeto transneptuniano 2014 MU69.

Tocando e interactuando, enviando sondas a la superficie de los planetas, tomando muestras y fotografías de primeros planos y midiendo temperaturas, vientos y la composición química de las distintas atmósferas, los astrónomos ahora son también geólogos, químicos, climatólogos y biólogos. Si los proyectos realizados hasta ahora y los que están en fase de ejecución han obtenido importantes resultados, los proyectos futuros prometen también una cosecha de datos de muy alta calidad para las nuevas generaciones de científicos.

La exploración de nuestro sistema solar es, sin duda, un campo de investigación en continua expansión. Cuando, en la primavera de 2012, hubo que elegir la primera misión Large del programa Cosmic Vision, la Agencia Espacial Europea (ESA) seleccionó JUICE (Jupiter icy moons explorer). Si JUICE es lanzado efectivamente en 2022, llegará a Júpiter en 2030 y orbitará alrededor de Ganimedes en 2033. El 4 de julio de 2016, coincidiendo con la fiesta de la independencia americana, llegó a la órbita de Júpiter la sonda Juno (de la NASA), que había sido lanzada en 2011. De los planetas rocosos, Mercurio es uno de los menos estudiados; las únicas misiones que se han acercado a él han sido la Mariner, con dos viajes, uno en 1974 y el otro en 1975, y la MESSENGER, que, lanzada en 2004, entró en su órbita en 2011 y continúa operativa. La ESA, en colaboración con la Agencia

Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), está terminando de construir BepiColombo, que llegará a Mercurio tras un viaje de casi siete años. Marte sigue siendo en todo caso uno de los destinos preferidos, por ser además meta probable de una futura exploración humana. Mientras Opportunity y Curiosity siguen circulando por el planeta rojo, y Mars Express y Mars Odyssey orbitando alrededor de este, la NASA y la ESA trabajan en nuevas misiones: la MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution), que está ya operativa y cuyo objetivo es estudiar la atmósfera marciana, y la pareja ExoMars 2016 y ExoMars Rover, en colaboración con Roskosmos, la Agencia Espacial Federal Rusa. Aunque nominalmente el objetivo de esta última misión sea comprobar la madurez y la fiabilidad de las tecnologías necesarias para futuras misiones de exploración marciana, está claro que ExoMars recogerá también datos que permitirán desarrollar importantes estudios científicos, siendo el más destacado de ellos la búsqueda de vida. En cuanto a los cuerpos menores, la sonda Dawn ha visitado Vesta y ahora está estudiando Ceres, el mayor de los asteroides del cinturón principal, pero habrá que esperar a 2020 para que Deep Impact visite, tal vez, el asteroide (163249) 2002 GT. Por último, la misión OSIRIS-REx, lanzada con éxito en septiembre de 2016, tiene como objetivo tomar muestras de la superficie del asteroide (101955) Bennu y traerlas a la Tierra para que sean analizadas.

La finalidad de todos estos esfuerzos científicos, tecnológicos y económicos es obtener datos sobre los planetas, asteroides y cometas, y hacer un censo de cuerpos celestes extremadamente heterogéneo en cuanto a dimensiones, morfología, características físicas, químicas y biológicas, composición, historia y evolución. Queremos y necesitamos entender cómo es nuestro sistema planetario, nuestra casa; cómo se formó, hasta qué punto es estable, por qué está compuesto por planetas tan diferentes entre sí, cómo fue en el pasado y cómo será en el futuro. Y también ¿hasta qué punto es representativo de los sistemas planetarios de otras estrellas o hasta qué punto es peculiar? Todo esto se puede resumir trasladando las preguntas «¿de dónde venimos?» y «¿adónde vamos?» del plano filosófico al científico. Estudiando los planetas cercanos a nosotros, aquellos que podemos tocar, buscamos una primera respuesta a estas preguntas, para luego pasar a los lejanos, a los que orbitan alrededor de otras estrellas. Desearíamos encontrar planetas parecidos a la Tierra para contestar la segunda pregunta, la relativa a la frecuencia y a las características de los planetas donde puede desarrollarse una bioquímica compleja que pueda dar lugar a formas de vida evolucionada o que puedan albergar un proceso análogo.

Desplazarse por el sistema solar es un proceso lento debido a las

grandes distancias que hay que recorrer. Voyager 1 tardó treinta y siete años en alcanzar la heliopausa, la zona donde cesa la influencia solar. La sonda Juno ha viajado durante cinco años para llegar a la órbita de Júpiter; en 2004 la ESA lanzó la sonda Rosetta, que se posó en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014. Se requieren muchos años, porque estamos limitados por la velocidad de las sondas, independientemente de los *gravity assists* —el efecto de onda gravitacional que se produce cuando una sonda pasa cerca de un cuerpo celeste— generados por los planetas que la sonda encuentra a lo largo de su camino o por la misma Tierra antes de abandonarla definitivamente. Es también un proceso enormemente costoso. Por ello, desde hace ya varios años, las principales agencias espaciales (como la NASA, la ESA y la JAXA) estudian nuevos sistemas de propulsión, como, por ejemplo, las velas solares.

El primero que pensó en las velas solares fue muy probablemente Kepler (1571-1630). El astrónomo alemán observó que la cola de los cometas apunta siempre en dirección contraria al Sol y pensó que podía deberse a la presión ejercida por su peso. Debió de volver a ello al escribir *El sueño*, novela en la que se cuenta un viaje espacial a la Luna. En una carta enviada a Galileo, el mismo Kepler se refiere de forma explícita a «velas» y «brisas celestes», además de a valientes navegantes espaciales. Podemos decir, por tanto, que la idea de las velas solares se remonta a principios del siglo XVII, pero no volvió a ser utilizada, ni siquiera en los viajes fantásticos a la Luna que han enriquecido nuestra fantasía y nuestra literatura. Incluso Julio Verne, que en 1865 imaginó naves espaciales alimentadas por la luz solar en *De la Tierra a la Luna*, prefirió recurrir a un cañón para hacer viajar a Michel Ardan y a su tripulación.

El principio en el que se basan las velas solares o estelares es conocido desde la época de J. C. Maxwell, que, en su teoría electromagnética, publicada en 1864, un año antes que la novela de Verne, mostró que la luz puede ejercer una presión. Algunos años después Piotr Lébedev lo comprobó en el laboratorio utilizando una balanza de torsión, y más tarde lo hicieron Nichols y Hull utilizando un radiómetro. Una de las primeras aplicaciones prácticas del efecto vela fue la utilización de la presión radiactiva solar para corregir la trayectoria de algunas sondas interplanetarias.

Una vez dentro de la órbita deseada, una nave espacial provista de velas solares no requiere tanto carburante como los propulsores tradicionales. Lo encuentra a lo largo del camino, en pequeñas cantidades, pero de forma ilimitada. Por otra parte, el impulso que recibe es pequeño pero continuo, por lo que la velocidad de la nave no deja de aumentar, al menos hasta que se aproxima razonablemente a una estrella, que en el caso de nuestro sistema solar significa dentro de

la órbita de Júpiter, llegando a alcanzar velocidades de crucero superiores a las de las sondas a propulsión química o eléctrica. De ese modo se pueden acortar los tiempos de exploración de la periferia de nuestro sistema, y por consiguiente los costes, y, lo que es todavía más importante, se puede ampliar el área de investigación. Una vela solar oportunamente guiada puede alcanzar una velocidad de 150.000-200.000 km/h y llegar a Plutón en menos de cinco años. La sonda New Horizons tardó en cambio nueve. Lanzada en 2006, alcanzó y sobrepasó a Plutón a una velocidad de 52.000 km/h. Misiones lanzadas en la dirección opuesta, es decir, hacia el Sol, se verían especialmente favorecidas, habida cuenta del aumento, cuadrático, a medida que disminuye la distancia de la fuente, de la presión radiactiva, que cerca de Mercurio alcanza valores superiores a los terrestres de más de un orden de magnitud.

Navegar a vela solar por el espacio interplanetario es una actividad reciente aún en fase experimental. Tiene enormes posibilidades, sobre todo para misiones que requieren mantener equipos en una órbita o posición inestable, o que pretenden llegar a los confines del sistema solar y superarlos; exactamente igual que la sonda interestelar que la NASA tenía en estudio ya a finales del siglo pasado, una misión a vela solar que debería acercarse al Sol para recibir un impulso que le permitiera alcanzar una velocidad de 15 UA/año, cinco veces superior a la de los Voyager, y explorar después el cinturón de Kuiper, los confines de la heliosfera y el medio interestelar que se encuentra a algunos centenares de UA de nosotros, navegando de bolina hasta el Sol y después viento en popa hacia Júpiter y más allá, quizá incluso hacia Alpha Centauri, el sistema estelar más cercano al nuestro. Actualmente, el proyecto Breakthrough Starshot se propone enviar una flota de miniastronaves equipadas con microdispositivos electrónicos, a vela solar, e impulsadas por potentes láseres rumbo a Alpha Centauri (a 4,4 años luz de distancia), a la que deberán llegar en aproximadamente veinte años. Financiado por el mecenas ruso Yuri Milner con 100 millones de dólares en diez años, ha recibido el respaldo del científico Stephen Hawking y de Mark Zuckerberg, fundador de Facebook.

Por desgracia, la «basura espacial» que rodea la Tierra se está convirtiendo en un peligro para los futuros lanzamientos de sondas y telescopios. De hecho, está mucho más extendida de lo que pensamos. Se estima que hay en órbita alrededor de medio millón de objetos de dimensiones comprendidas entre uno y diez centímetros (los inferiores a un centímetro deben de ser más de cien millones). El grueso de los detritus espaciales se condensa en las llamadas «órbitas bajas», situadas a una altura de la superficie terrestre comprendida entre los cuatrocientos y los dos mil kilómetros, sobre todo en las órbitas

polares. Una de las conclusiones alcanzadas en la sexta conferencia europea sobre basura espacial, celebrada en el Centro Europeo de Operaciones Espaciales (European Space Operations Centre) de Darmstadt en abril de 2013, es que, si no se actúa para eliminarla, la probabilidad de colisiones seguirá aumentando con el tiempo y, antes de que acabe el próximo siglo, será veinticinco veces superior a la actual. Se calcula que para invertir la tendencia al aumento del número de detritus serán necesarias entre tres y diez misiones de «eliminación» al año. No es un problema fácil, por lo que se están estudiando medidas. Si queremos seguir explorando, debe solucionarse.

# 8

## INFINITOS SOLES, INNUMERABLES MUNDOS

Giordano Bruno (1548-1600) ya imaginó a finales del siglo XVI infinitos soles e innumerables mundos y escribió sobre ellos. Eran fantasías contrarias a otras fantasías: una sentencia del 24 de agosto de 1594, firmada por el cardenal Bellarmino, condenaba como herética la pluralidad de los mundos, pero más por falta de pruebas que por otra cosa. Bruno podría haber soslayado la implicación teológica si hubiera admitido que la Creación es infinita, pero que el Creador lo es más. Giordano Bruno y Bellarmino seguramente ignoraban los estudios de Gersónides, que doscientos años antes había teorizado, no imaginado, un cosmos complejo y abarrotado de miles de millones de astros. O tal vez lo ignoraban deliberadamente, ya que, de hecho, a ninguno de los dos les interesaba ni la investigación científica ni «la observación».

Así pues, ya entonces había quienes estaban convencidos de que el universo era rico en planetas que, como la Tierra, orbitaban alrededor de su estrella. Sin embargo, esta convicción mística seguía sin confirmarse a finales del siglo pasado; ningún planeta exterior a nuestro sistema solar había sido avistado y solo la fantasía daba respuestas a las muchas y fascinantes preguntas al respecto. Aunque se sabía que vivimos en una galaxia compuesta por cientos de miles de millones de estrellas, los planetas que se conocían en aquella época ocupaban el reducidísimo espacio de nuestro sistema solar.

Después, en pocos años, hemos pasado de proponer algunos posibles candidatos a planetas —varios de ellos desmentidos y otros, los menos, arduamente confirmados— a inventariar más de tres mil exoplanetas, muchos de ellos en sistemas planetarios múltiples, aparte de algunos candidatos en espera de confirmación. Esta cifra está destinada a aumentar muy rápidamente[28]. ¿A qué se debe este rápido e impresionante cambio de ritmo? ¿Cómo hemos pasado de la posibilidad de estar solos, como sistema planetario, a la certeza de ser, por el contrario, uno entre muchísimos?

Simplemente hemos aprendido a mirar, hemos perfeccionado los

instrumentos necesarios para ver, y ahora sabemos captar detalles que hasta hace unos años se nos escapaban. Galileo sabía «ver» no solo con los ojos. Comenzó con un pequeño telescopio de solo tres aumentos que él mismo se construyó en el verano de 1609. Pocos meses después ya tenía un instrumento de ocho aumentos, y en noviembre de ese mismo año llegó a veinte aumentos. Galileo tenía los mejores telescopios de la época y no cesaba de mejorarlos, lo mismo que hicieron después de él generaciones de astrónomos, empezando por los italianos Eustachio Divini (1610-1685) y Giuseppe Campani (1636-1715), que se distinguieron como los mejores constructores de telescopios de la época. Galileo yacía ya dentro de su glorioso mausoleo en la muy católica basílica florentina de la Santa Cruz. El monumento, en el que se encuentra perfectamente representado el sistema heliocéntrico, había sido financiado por el Rey Sol en persona. Mientras tanto, Newton había proyectado y construido en Londres el primer telescopio reflector. Corría el año 1668 y la necesidad del *longe prospicio* no solo era advertida por los científicos. Fue, por tanto, la *Rule, Britannia*!, a la conquista de los océanos más que de los cielos, la que desde entonces produjo los mejores instrumentos.

Sin embargo, para observar el cielo astronómico se requería mucho más que un telescopio extensible y fácilmente transportable, adecuado a un gaviero de barco. A finales del siglo XVIII William Herschel construyó un instrumento que sería muy incómodo de llevar en una nave, pero que ampliaría enormemente el espacio visible. Se trataba del mayor telescopio del mundo en la época y lo seguiría siendo hasta 1845, cuando fue finalizado el Leviatán de Parsonstown, un reflector newtoniano con un espejo primario de 1,2 m de diámetro, de una tonelada de peso y montado en un tubo rígido de doce metros de largo. Para llegar al ocular, situado en la parte superior del instrumento, el observador debía trepar por el armazón hasta una altura de quince metros. Hoy tenemos telescopios de diez metros de diámetro y está en construcción uno de casi cuarenta metros. Se encuentran ubicados en los mejores lugares de la Tierra para efectuar observaciones astronómicas, y también en el espacio. La sensibilidad del equipo ha mejorado además en muchos órdenes de magnitud, pasando del ojo humano a las placas fotográficas y después a los reveladores electrónicos. Por otra parte, el equipo se ha especializado todavía más, optimizando sus características en función de los objetivos científicos a alcanzar. En estos últimos años se ha puesto mucho énfasis en los instrumentos dedicados al descubrimiento y al estudio de los planetas extrasolares. No hay que olvidar, sin embargo, que en la gran mayoría de los casos no tenemos una imagen directa de estos cuerpos celestes. Sabemos de su existencia y de sus características —masa, dimensiones, periodo orbital, distancia de la

estrella, etc.— a través del análisis de las pequeñísimas perturbaciones que provocan en su sol.

Nuestra capacidad de estudiarlos está progresando mucho y muy rápido. En veinte años hemos pasado de las mediciones indirectas de su existencia a través de las perturbaciones en el movimiento de la estrella en torno a la que orbitan, con el método de las velocidades radiales, o de la ligera disminución de la luz que recibimos de dicha estrella cuando pasan a su lado, con el método de los tránsitos, a la determinación —combinando en la medida de lo posible los datos extraídos de los tránsitos y de las mediciones de las velocidades radiales— de su masa y dimensiones, y por tanto de su densidad, pudiendo así distinguir entre planetas gaseosos y planetas rocosos, y finalmente a las primeras, aunque escasas, imágenes directas.

Pero el verdadero avance se ha producido con las primeras observaciones de las atmósferas de los exoplanetas. De nuevo es la espectroscopia la que marca la diferencia, como en la transformación de la astronomía en astrofísica. Transformación, integración o evolución, no repentina, e intuida como necesaria desde hace siglos. Los pensadores medievales ya habían examinado características como la luminosidad, la densidad, la temperatura y el color de la luz de los cuerpos celestes, pero no sabían explicarlas debido a la falta, en este caso, de conocimientos químico-físicos. Lo que permitió la interacción entre la disciplina matemático-observacional (mecánica celeste) y la praxis actual fueron los conocimientos logrados en el siglo XIX —en el campo de la química, la forma de agregación de las moléculas y, en el campo de la física, la estructura de la materia (el átomo y su estructura)—. En 1860 G. R. Kirchhoff, siguiendo el trabajo de Fraunhofer, demostró la inesperada presencia de sodio en la superficie del Sol, creando la disciplina de la espectroscopia estelar, en contra de lo que pensaba Auguste Comte, que como buen filósofo positivista había sostenido no hacía muchos años que nunca podríamos estudiar la composición química de las estrellas al no poderlas analizar directamente en el laboratorio.

Con la espectroscopia astronómica, la física y la química entraron a formar parte de la astronomía, definiendo la astrofísica. Pronto, otras técnicas y conceptos, derivados de la práctica instrumental de laboratorio y de los estudios de física atómica y nuclear, entraron con pleno derecho en las investigaciones astronómicas. La astronomía ha ido sufriendo así continuos cambios conceptuales y metodológicos, generando astronomías hermanas —empezando por la radioastronomía— a medida que se conquistaba todo el espectro electromagnético para los estudios del universo. Hoy en día la distinción entre astronomía y astrofísica ha perdido su razón de ser. En resumidas cuentas, el estudio del espacio minúsculo ha sido

fundamental para comprender el espacio enorme. No obstante, para retomar los temas del principio de esta historia, la verdadera ampliación del espacio ha sido la que se ha producido en la mente humana.

Volviendo a las observaciones de los planetas extrasolares, ya hemos observado espectroscópicamente la atmósfera de algunas docenas de ellos. Lo hemos hecho sobre todo utilizando las pequeñas diferencias en el espectro del sistema estrella-planeta, comparando los datos obtenidos antes del tránsito, durante el tránsito primario, cuando el planeta se encuentra delante de su estrella, y durante el tránsito secundario, cuando el planeta se encuentra detrás de la estrella. El interés reside sobre todo en la posibilidad de reconocer en las atmósferas de los planetas algunos potenciales bioindicadores, como por ejemplo el oxígeno y el metano, o la presencia de vapor de agua, indicador de la existencia de océanos. Son observaciones muy críticas y difíciles de realizar con los telescopios terrestres, pero se encuentran en estudio misiones espaciales especializadas que nos permitirán hacer grandes progresos en este campo. Entre ellas ARIEL (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey, de la ESA; misión propuesta y todavía no seleccionada) y FINESSE (Fast infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer, de la NASA), que se proponen llevar a cabo precisamente el estudio específico de las atmósferas de los exoplanetas. Solo nos queda esperar y estar preparados para las inevitables sorpresas que tendrán lugar.

El horizonte del conocimiento se ha ido ampliando, y es la ciencia, y ya no solo la fantasía, la que da respuestas a las múltiples preguntas sobre la naturaleza de los innumerables mundos que pueblan nuestra galaxia y que, como es razonable suponer, pueblan las demás galaxias del universo. El horizonte se ha desplazado más allá y hoy la atención ya no se centra en la existencia de otros mundos, sino en la existencia de mundos parecidos a la Tierra y, como esta, habitables. Es previsible que, dentro de algunos años, una vez adquirida la capacidad de estudiar sistemáticamente las atmósferas de los planetas y su composición química, y después de haber encontrado marcadores como el oxígeno, el metano, el anhídrido carbónico y el vapor de agua, estableciéndose así la existencia de una miríada de mundos habitables, el interés se desplace a la investigación de los mundos habitados.

En estos estudios es importante no ser víctimas de nuestro antropocentrismo ni de nuestra recurrente presunción de unicidad, como Copérnico, Galileo y Darwin nos han enseñado. Aún no conocemos todas las formas de vida que habitan en nuestro planeta y solo recientemente hemos descubierto hábitats submarinos donde la vida se desarrolla en condiciones que considerábamos imposibles,

como, por ejemplo, sin luz solar alguna. Debemos aprender, por tanto, a no establecer condiciones excesivamente restrictivas para imaginar el desarrollo de vida en el universo y a no utilizar nuestra experiencia, que es particular y limitada, como criterio universal. ¿Qué sabemos realmente de las condiciones que permiten el desarrollo de la vida? ¿Cuánto tiempo necesita esta para desarrollarse y evolucionar? ¿Cuánto dura la condición de habitabilidad? ¿Cuál es la velocidad de adaptación al ambiente y a sus mutaciones? Fermi formulaba perfectamente la siguiente pregunta: «Si el universo está plagado de alienígenas, ¿dónde se encuentran?». ¿Y cuál es la solución de esta paradoja, si realmente lo es? La fantasía, respetando las leyes de la física, la química y la matemática, es siempre un instrumento importante para ampliar el campo de nuestros conocimientos, la fantasía entendida como negación de los condicionamientos, como liberación de imperativos no necesarios, sino impuestos por nuestro antropocentrismo.

El universo es un increíble terreno de posibilidades donde los grandes números hacen posible, y a veces incluso común, lo que es altamente improbable y donde las sorpresas son continuas. Lo importante es continuar estudiando y aplicando a nuestros estudios el mejor método que hemos sabido desarrollar desde los tiempos de Galileo hasta hoy: el método científico. Estamos solo al principio, hay tantas preguntas fundamentales a las que responder que el siglo que acaba de empezar promete ser especialmente interesante para el desarrollo del conocimiento, sobre todo para las generaciones que vivirán una gran parte de él y verán el principio del próximo.

Ya hemos dicho que, aunque hay muchos aspectos interesantes en el estudio de los exoplanetas, lo que realmente interesa, fascina y tiene unas implicaciones formidables en nuestro futuro, desde muchos puntos de vista, es descubrir planetas habitables e incluso habitados. Todos nos preguntamos cuántos serán y cómo conseguir hacer un cálculo razonable. Muchos se inclinan a pensar que, una vez más, nos quedaremos sorprendidos al descubrir que el resultado es mayor de lo que habríamos imaginado, del mismo modo que la Tierra ha resultado ser más grande, que no acaba en las columnas de Hércules, o que el sistema solar se extiende mucho más allá de Saturno. Necesitamos una ecuación que nos permita calcular cuántos alienígenas pueblan el universo.

Las ecuaciones, una forma extremadamente concisa y simbólica de describir un fenómeno, son igualdades que pueden ser utilizadas para encontrar el valor de un término, la incógnita, cuando se conocen los valores de los otros términos. La ecuación $v = s / t$ (donde $v$ es la velocidad, $s$ la distancia y $t$ el tiempo), por ejemplo, es utilizada por los *tutor* de las autopistas (sistema de control de tramos) para

controlar que los automovilistas respeten los límites de velocidad. Sabiendo la distancia *s* entre dos detectores de paso y midiendo el tiempo transcurrido entre el primero y el segundo paso se obtiene fácilmente la velocidad media. Una ecuación que no pudiera ser resuelta ni obtener un resultado sería cuando menos sorprendente. Y precisamente este es el caso de la ecuación, famosa pero controvertida, que formuló el radioastrónomo Frank Drake en 1961, del que recibió el nombre. La ecuación nace con motivo de la primera conferencia SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) organizada en Green Bank, en Virginia Occidental, para responder a la pregunta que está en la base del proyecto SETI: «¿cuántas civilizaciones hay actualmente en nuestra galaxia con las que se puede establecer una comunicación por radio?». El planteamiento de Drake es abordar el problema como un problema de Fermi. Es decir, como un problema que puede ser descompuesto en sus términos más elementales y resuelto estableciendo un análisis por órdenes de magnitud y estimaciones razonables de las cantidades en juego, cuyos valores, sin embargo, no pueden determinarse con exactitud.

Un ejemplo de problema de Fermi es el siguiente: ¿cuántos pelos tenemos en la cabeza? Para obtener un cálculo razonable es necesario saber el tamaño de la zona en la que crecen los pelos y cuál es su densidad. Podemos, por tanto, asumir que la cabeza humana es esférica y que tiene un diámetro de 20 cm; que el cuero cabelludo ocupa aproximadamente 1/3 de su superficie; y que la densidad del cabello es de tres pelos por milímetro cuadrado. Con estas hipótesis se obtiene una estimación de *N* (número de cabellos) de aproximadamente 100.000 [4 × π × (20/2)2 × 1/3 × 300]. Volviendo a los alienígenas de nuestra galaxia, la ecuación de Drake es la siguiente:

$$N = R^* \, fp \, ne \, fl \, fi \, fc \, L,$$

donde *R** es el índice medio de formación estelar en la galaxia, *fp* es la fracción de estrellas alrededor de las cuales existen sistemas planetarios, *ne* es el número medio de planetas, o satélites, por sistema planetario que pueden permitir el desarrollo de vida, *fl* es la fracción de aquellos en los que efectivamente se desarrolla la vida, *fi* es la fracción en la que la vida evoluciona hacia formas inteligentes (civilizaciones), *fc* es la fracción de dichas civilizaciones que desarrolla una tecnología para transmitir señales de radio detectables en el espacio y, finalmente, *L* es el tiempo durante el cual esa civilización transmite efectivamente en el espacio señales de radio detectables.

Multiplicando todos estos factores entre sí se obtiene un número puro, adimensional, dado que el primer término tiene las dimensiones

de una frecuencia, el último de un tiempo y el resto son otros tantos números puros. Lo que se obtiene es, por tanto, *N*, el número de civilizaciones de nuestra galaxia que transmiten efectivamente señales de radio en el espacio. Es claro que cuando la ecuación fue presentada, en el año 1961, los distintos parámetros que la definen eran tan inciertos, si no completamente desconocidos, que la hacían completamente inutilizable. Baste recordar, por ejemplo, que en aquel tiempo no se había descubierto ni un solo planeta extrasolar. Así pues, haciendo las oportunas hipótesis, no sustentadas por ningún hecho pero tampoco rechazables con certeza, era posible resolverla obteniendo para *N* valores comprendidos entre cero y muchos miles de millones. En esto consistía la controversia sobre la importancia de la ecuación de Drake; que pueda resolverse obteniendo lo que se quiera proporciona buenos argumentos a quienes la consideran inútil. Si Wolfgang Pauli viviera, tal vez la habría desechado con su proverbial frase («Ni siquiera es falso»), con la que desechaba todo lo que consideraba una pseudociencia. Otros la ven, en cambio, como un útil e interesante ejercicio intelectual, digno, de vez en cuando, de ser revisado.

De hecho, desde que Drake escribió su ecuación hemos hecho muchos progresos, lo que nos permite reflexionar al menos con mayor confianza sobre sus primeros términos. En estos últimos años el índice de formación estelar en nuestra galaxia ha sido objeto de exhaustivos estudios en diferentes longitudes de onda que se han servido de los datos obtenidos con los mejores observatorios espaciales disponibles, tanto en la Tierra como en el espacio, desde GALEX a Spitzer, pasando por Hubble y Herschel. Sabemos que dicho índice es del orden de 1-2 masas solares al año y que este valor es conocido dentro de un factor de dos. El primer término de la ecuación, de total competencia de los astrónomos, puede considerarse conocido. Incluso el segundo término (la fracción de estrellas con planetas) es responsabilidad de los astrónomos, quienes ya han confirmado la existencia de más de tres mil planetas extrasolares, aunque los que están en fase de estudio son todavía más. De estos, muchos se encuentran en sistemas múltiples, sistemas en los que, como el nuestro, orbitan diferentes planetas en torno a la misma estrella. Se afianza la convicción, por tanto, de que es muy común que una estrella esté rodeada de un sistema planetario complejo. Así pues, los astrónomos están aportando claridad y también reduciendo las incertidumbres sobre el segundo término de la ecuación; *fp* —la fracción de estrellas alrededor de las cuales existen sistemas planetarios— es grande, probablemente muy próxima a 1.

Estamos trabajando sobre *ne* —el número de planetas de un sistema planetario con condiciones favorables para el desarrollo de la vida; planetas que se encuentran, por tanto, en la llamada «zona de

habitabilidad»— y sobre *f1* —la fracción de estos en los que efectivamente surge la vida—, pero tendrá que pasar tiempo antes de que se puedan tener estimaciones cuantitativas sustanciosas. En cualquier caso, empiezan a aparecer algunos resultados preliminares; un reciente análisis de los datos obtenidos por el satélite Kepler, por ejemplo, ha llevado a algunos investigadores a afirmar que el 22 por ciento de las estrellas semejantes al Sol posee planetas del tamaño de la Tierra orbitando en la zona habitable[29]. No obstante, conviene recordar que el concepto «habitable» no es compartido en absoluto por los científicos y sigue siendo objeto de reflexiones y discusiones. Lo que los astrónomos pueden hacer, porque además se están diseñando instrumentos cada vez más adecuados para ello, es definir cada vez mejor las propiedades de los planetas descubiertos (el albedo, la temperatura superficial y sus variaciones, las características orbitales, etc.) y estudiar concretamente sus atmósferas para saber si se prestan al desarrollo de alguna forma de vida o si incluso ya la están albergando. Aquí el discurso se vuelve inevitablemente más incierto, desde el momento en que no tenemos experiencia en otras posibles formas de vida, ya que solo conocemos las que se han desarrollado en la Tierra. La determinación de *ne* y de *f1* es en cualquier caso posible; requerirá tiempo y una gran cantidad de datos, y también, obviamente, la colaboración de químicos, biólogos y geólogos, pero no hay razón para que en un futuro no tan lejano no se puedan determinar, con razonable aproximación, los primeros cuatro términos de la ecuación de Drake.

No obstante, aquí el razonamient llega a su fin; *fi* —la fracción de planetas en los que la vida evoluciona en formas inteligentes organizadas en civilizaciones— y *fc* —la fracción de estas civilizaciones que desarrolla una tecnología capaz de transmitir señales de radio detectables en el espacio— son objeto de pura especulación. Por no hablar de *L*, la duración de una civilización que pueda establecer comunicación por radio interestelar y esté interesada en ella, sobre la que se ha debatido únicamente en las novelas de ciencia ficción y que, al menos mientras estemos solos y no dispongamos, por tanto, de datos al respecto, es imposible de determinar. Sin embargo, esta no es una razón de peso para descartar la ecuación de Drake. Vale la pena revisarla y preguntarse si se puede mejorar reformulando la pregunta inicial, desplazando el interés del número de «radioaficionados» en nuestra galaxia —justificado por el interés de Drake en el entonces incipiente proyecto SETI— al número, ciertamente mayor y más fácilmente determinable, de formas de vida complejas. Esta generalización está motivada y justificada por el creciente interés por el estudio de los exoplanetas, que se ha hecho posible por la impresionante cantidad y calidad de los datos ahora

disponibles y en previsión de los que habrá los próximos años. Si pensamos en nuestro planeta, podemos darnos cuenta de que hemos sido «radioaficionados», escuchando poco y no hablando casi nunca, durante una fracción completamente insignificante del tiempo en que hasta el momento nuestro planeta ha sido, en cambio, «habitable». Un estudio de la Tierra, análogo al que nosotros estamos llevando a cabo en los exoplanetas, realizado por algún alienígena en cualquier momento de los últimos 2.000 millones de años, demostraría lo interesante que es el tercer planeta más interior del sistema solar; pero nadie se percataría de nuestra existencia escuchándonos a 1.420 MHz, salvo durante una fracción ridícula de este tiempo (en una primera aproximación $3 \times 10 - 8$, o sea, 30.000 millonésimas partes).

En realidad, también el concepto «habitable» es controvertido y objeto de continuos debates; algunos sostienen que podría haber condiciones de habitabilidad fuera de la llamada «zona de habitabilidad». En todo caso, ¿habitable para quién? ¿Para nosotros, esto es, para el *Homo sapiens* que ha evolucionado en la Tierra en las condiciones que nos son familiares? ¿Para una genérica forma de vida como las que conocemos y cuya química está basada en el carbono? ¿Para los extremófilos? Estos últimos son organismos vivos, microbios, pero también organismos más complejos, como los tardígrados y algunos gusanos e insectos, que viven en condiciones «extremas» y encuentran habitables ambientes para nosotros vedados. Los tardígrados, en concreto, son capaces de sobrevivir en ambientes con mucha radiación, a temperaturas y presiones extremas e incluso en el vacío espacial. También sus huevos son capaces de sobrevivir en el espacio y podrían, por tanto, ser transportados a otros planetas para que se abrieran en ellos. En suma, existe el riesgo de volver a caer en el antropocentrismo a la hora de definir el término «habitable» y de carecer de la apertura mental necesaria para imaginar sistemas bioquímicos diferentes a los del carbono o situaciones que nunca hemos experimentado, favorables al desarrollo de la complejidad.

Por otra parte, la definición de «zona habitable», basada casi exclusivamente en la distancia de la fuente de energía, la estrella, no tiene en cuenta otras posibilidades. Desprecia, por ejemplo, la posibilidad de que las lunas rocosas de los gigantes gaseosos, como Europa, Ganimedes y Calisto, con su probable agua líquida debajo de una capa de hielo y pese a estar situadas fuera de la zona habitable, alberguen vida, obteniendo su fuente de calor y energía del estrés gravitacional inducido por su planeta. Incluso Encélado, luna del todavía más lejano Saturno, parece albergar agua líquida bajo su capa de hielo. Parece, por tanto, que en el sistema solar las posibilidades de encontrar formas de vida extraterrestre son mucho mayores más allá de la zona habitable, donde el único planeta, además de la Tierra con

su Luna, es Marte.

Una posible aportación de la astronomía a la astrobiología es seguir buscando y encontrando exoplanetas, sean habitables o no. Para poder dar un salto cualitativo en el estudio de los exoplanetas y que este no se limite a la compilación de una larga lista de objetos, será necesario, no obstante, estudiar y definir sus atmósferas con observaciones espectroscópicas específicas. Ya hemos empezado a hacerlo, empleando diferentes técnicas, con un reducido número de planetas. Como demuestran los resultados obtenidos en 2013 en relación con el sistema planetario de HR 8799, es muy prometedor un proyecto concebido para observar, a lo largo de tres años, sistemas planetarios que orbiten alrededor de aproximadamente doscientas estrellas. Se han observado las atmósferas de cuatro planetas que orbitan alrededor de HR 8799 y que han resultado ser muy diferentes entre sí, con la presencia, en diferentes combinaciones y proporciones, de amoniaco, acetileno, metano y anhídrido carbónico[30].

La misión espacial Echo de la ESA, dedicada al estudio de las atmósferas de los planetas, habría podido hacerlo aún mejor si hubiera sido seleccionada. En lo que respecta a la investigación de otras formas de vida en el universo, quizá nos suceda lo mismo que con los planetas extrasolares: antes no sabíamos cómo encontrarlos y pensábamos que no existían, después descubrimos uno o dos, casi por azar, y finalmente, una vez encontrada la forma de descubrirlos, han aparecido miles de ellos. Hoy nos parece obvio el hecho de que existan tantos exoplanetas, incluso nos preguntamos cómo pudimos pensar que el sistema solar fuera único. El universo no solo es grande, y se va probando que es cada vez un poco mayor de lo que pensábamos, sino que también es increíblemente paciente: ha tenido un montón de tiempo, más de 13.000 millones de años, para permitir que lo improbable se volviera cierto, y lo raro, habitual.

# 9

## MIL, CIEN MIL, CIEN MIL MILLONES

Las estrellas perceptibles a simple vista, en una noche despejada y oscura de luna nueva, apenas son unos miles. El número exacto depende de la agudeza visual del observador, del grado de oscuridad de la noche, del tamaño de la parte de bóveda celeste que consiga ver y del lugar en el que se encuentre.

Hasta 1609 estos pocos miles de luces constituían todo el universo conocido. A principios del siglo XVII se seguía mirando el horizonte y estudiando el cielo a simple vista. Las gafas se habían inventado en Europa en la Edad Media para corregir los defectos de la vista, y mucho antes se habían inventado las lentes de aumento, que permitían estudiar con detalle objetos cercanos o leer caracteres diminutos. Como hemos dicho, en 1538 Girolamo Fracastoro concibió en Padua alinear de forma oportuna dos lentes para poder ver agrandados, y enfocados, los objetos lejanos. El proyecto se materializó en 1608 en Holanda, donde se construyó el primer telescopio, utilizado solo de día para echar un vistazo. Galileo Galilei lo perfeccionó para observar el cielo de noche, revolucionando así la astronomía.

Las estrellas que percibimos a simple vista, pese a ser las más cercanas a nosotros, se encuentran a una distancia mucho mayor de lo que imaginaron nuestros ancestros. El término «distancia» se repite obviamente en esta obra sobre el espacio, pero es un concepto sobre el que merece la pena volver. En la Antigüedad, cuando una persona, no necesariamente un primitivo, miraba desde la cima de una montaña la montaña de enfrente, se daba cuenta perfectamente de que no se encontraba lejos —un gavilán llegaba volando a ella casi sin esfuerzo —. En cambio, a él, bípedo terrestre, no le quedaba más remedio que bajar la montaña, cruzar quizá un torrente, volver a subir…, por lo que podía emplear en ello todo el día. Empíricamente se introducía también en la «distancia» el factor temporal. Pero en los siglos más cercanos a nuestra época, digamos en los últimos veinticinco, los mejores cerebros se han puesto a prueba para medir las distancias en

términos lineales, cuantificables y divisibles, o sea, en términos estrictamente matemáticos.

El método trigonométrico era el utilizado para medir la Tierra y el cielo. Cuando en 1572 se publicó en Pésaro, dentro de los Estados Pontificios, el *De magnitudinibus, et distantiis Solis, et Lunae* de Aristarco, los astrónomos de la época se felicitaron al comprobar su antigüedad, es decir, su autoridad. Kepler no se aparta de Aristarco al enunciar su tercera ley en 1619, ni tampoco Cassini ni Jean Richer, quien en 1672 y desde la Guayana Francesa, calculó la distancia a Marte.

Sin embargo, en el siglo XIX la investigación astronómica tuvo que afrontar distancias muchísimo más grandes para las que la unidad astronómica ya no era suficiente. Herbert Hall Turner fue el primero en introducir la unidad de medida del pársec —o paralaje, anual, de un segundo de arco—, fracción de grado apropiado para los cálculos de las nuevas distancias cósmicas que se estaban detectando. El pársec (pc) equivale a algo más de 200.000 UA (206.265 para ser más exactos), y con sus múltiplos es la unidad habitualmente utilizada para las distancias hasta los confines del universo observable.

De entre las estrellas que percibimos a simple vista, la más alejada es Deneb, en la constelación de Cygnus (el «Cisne»). Se encuentra a más de 500 pársecs (1.600 años luz) de nosotros, a una distancia que supera, por tanto, en más de cien millones de veces la distancia de la Tierra al Sol. En realidad, el universo «observable a simple vista» es mucho más grande, ya que la galaxia de Andrómeda, en condiciones favorables, también se puede distinguir a simple vista y se encuentra a dos millones de años luz. No obstante, durante siglos hemos ignorado su distancia y también su naturaleza de galaxia, igual que nuestra Vía Láctea.

En el cielo, en efecto, hay muchas más estrellas que unos cuantos miles. El primero en demostrarlo fue Galileo, que, con su telescopio, observó muchas estrellas que hasta entonces eran invisibles por ser demasiado tenues para que se pudieran percibir a simple vista, y comprendió que la nebulosidad de la Vía Láctea se debía a una miríada de ellas, tenues y lejanas. Desde entonces han pasado cuatro siglos, durante los cuales los astrónomos no han dejado de construir telescopios cada vez más potentes para conseguir ver cuerpos celestes cada vez más tenues o lejanos. Y a lo largo de los siglos no hemos dejado de comprobar que por muy lejos que consigamos observar siempre hay algo que descubrir más allá. Nuestra conciencia de la riqueza del universo aumenta con nuestra capacidad para apreciarla.

Del estudio de la distancia y distribución de las estrellas hemos obtenido progresivamente la forma y las dimensiones de nuestra

galaxia, que hoy sabemos que tiene forma de espiral, una aglomeración de algunos cientos de miles de millones de estrellas dispuestas en un disco con un diámetro de 100.000 años luz y un grosor de 1.000 años luz. Cuando, a finales del siglo XVIII, William Herschel se puso a contar estrellas en diferentes zonas del cielo para estudiar la forma de la galaxia y nuestro lugar en ella, seguía considerándola como todo nuestro universo. Pese a creer que el sistema solar ocupaba un lugar más central del que realmente ocupa, Herschel obtuvo correctamente, aunque infravalorando las dimensiones, su forma tridimensional de disco, o de «rueda de molino», por utilizar su expresión. Sin embargo, ya en 1750 Thomas Wright (1711-1786) había considerado la posibilidad de que las tenues nebulosas visibles con el telescopio, que en aquellos años empezaban a ser catalogadas de manera sistemática tanto por el mismo Herschel como por el francés Charles Messier (1730-1817), fueran «creaciones externas» o «universos isla», utilizando la expresión introducida por Immanuel Kant.

La de Wright era solo una idea, pero se encuadraba en el contexto del pensamiento empírico característico de la Inglaterra del siglo XVIII. En 1755 se publicó en una revista alemana una síntesis aproximada de sus teorías que hizo reflexionar al joven Kant, todavía imbuido del pensamiento metafísico germánico. El futuro filósofo, con escasas lecturas científicas, se basó en dicho texto para escribir una publicación ambiciosamente titulada *Historia natural y teoría general del cielo: Ensayo sobre la constitución y el origen mecánico del universo, tratado de acuerdo a los principios de Newton*. Las premisas ideológicas, compartidas por lo demás por Newton, se basaban en la tesis de una arquitectura del universo perfectamente ordenada y equilibrada. Los «universos isla» se habrían unido formando gigantescos continentes astrales, en un movimiento conforme a las leyes ordinarias de la Creación. Y, sin embargo, el desconcierto de Kant ante tanto concierto acabó por manifestarse: «Entonces, ¿cuál será en último término el final [*das Ende*] de todo este orden sistemático? ¿Dónde se detendrá la creación?». Posteriormente, y de una forma más provechosa, se entregó a otras críticas. Según algunos, el desconcierto experimentado ante la amplitud del espacio sensible fue sucesivamente sublimado por Kant a la «categoría» de espacio, una categoría completamente interior que no plantea problemas de investigación ni comprobación astronómica.

En el siglo XIX, mejores telescopios permitieron profundizar en el estudio de las nebulosas para comprender si eran cúmulos de estrellas no resueltas u objetos realmente difusos. En cualquier caso, se las consideraba partes de la galaxia. En 1847, William Parsons (1800-1867), conocido como Lord Rosse, completó la construcción del

que en la época fue el telescopio más grande del mundo, el Leviatán, de seis pies de diámetro por 53 de longitud (1,8 m × 16 m), y pudo clasificar morfológicamente algunas de esas nebulosas por su estructura en espiral. Observó también que en algunas de ellas se distinguían puntos luminosos, franjas oscuras y filamentos. Estaban madurando las condiciones para comprender que el universo era muchísimo más grande de cuanto nadie pudiera imaginar. Uno de los primeros en darse cuenta fue Heber Doust Curtis (1872-1942), del observatorio Lick, en California. A principios del siglo pasado, Curtis observó una docena de novas en la entonces denominada «nebulosa de Andrómeda» aproximadamente 10.000 veces más débiles que las de nuestra galaxia. Utilizó esos datos para calcular una distancia de 500.000 años luz aproximadamente para la nebulosa de Andrómeda —hoy sabemos que está cinco veces más lejos—, situándola claramente fuera de nuestra galaxia. Animado por estos datos, propuso la hipótesis de los «universos isla», sosteniendo que las nebulosas no eran otra cosa que galaxias parecidas a la nuestra, pero exteriores y distantes. Harlow Shapley (1885-1972) puso en duda esta hipótesis y ambos discutieron sobre la naturaleza de las nebulosas y sobre el tamaño del universo en un debate público que tuvo lugar en Washington en 1920.

La controversia, sin embargo, no duró mucho. En 1925, Edwin Hubble (1889-1953), utilizando el telescopio Hooker de 2,5 m, que hacía pocos años que se había convertido en el más grande del mundo, identificó algunas cefeidas (una clase especial de estrellas variables cuyo periodo de variabilidad está unido a su luminosidad absoluta) en Andrómeda y en otras nebulosas. Del periodo de variabilidad obtuvo la luminosidad absoluta, intrínseca, y la comparó con la aparente, medida, pudiendo obtener así su distancia. El resultado dio la razón a Curtis, poniendo fin definitivamente al debate. Una vez más el tamaño del universo era revisado al alza. Nuestro universo no solo resultaba ser miles de millones de veces más grande, sino que además contenía innumerables galaxias parecidas a la nuestra, tal y como Wright y Kant habían intuido ciento cincuenta años antes. Si se prescinde de la reciente hipótesis del multiverso, nacida en la segunda mitad del siglo pasado y no sostenida por evidencias observacionales, el reconocimiento de la existencia de una multitud de galaxias diferentes y alejadas de la nuestra representa el salto más significativo en la historia de nuestra conciencia de la medida y de la riqueza del universo.

Las observaciones sistemáticas obtenidas por Hubble, y por Humason, de las nebulosas, hoy rebautizadas con el nombre de «galaxias», permitieron afianzar la hipótesis de que el universo podía incluso estar expandiéndose. Esto es lo que Georges Lemaître

(1894-1966) fue el primero en deducir de la teoría de la relatividad general de Einstein y de las primeras observaciones espectroscópicas de Vesto Slipher (1875-1969), que mostraban en los espectros de las galaxias unas líneas características de transiciones atómicas a una longitud de onda diferente de la observada para los mismos átomos en el laboratorio. En las galaxias las líneas eran registradas a una longitud de onda mayor; por lo tanto, se desplazaban hacia el rojo (de ahí el término «corrimiento al rojo»), lo que indica el alejamiento de la fuente, en analogía con el conocido efecto Doppler sonoro. El espacio que nos contiene no solo se volvía enorme y dinámico, sino que también cambiaba de características, tanto por obra de la teoría de la relatividad general, que introducía el espacio-tiempo como indisoluble conjunción de dos entidades hasta entonces consideradas diferentes, como por obra de la mecánica cuántica, que con la longitud de Planck, obtenida al combinar tres constantes fundamentales (la velocidad de la luz, la constante de gravitación universal y la constante de Planck, cuya medida es $1{,}6 \times 10^{-35}$ metros), ponía un límite conceptual al concepto de distancia.

En menos de doscientos años, de finales del siglo XVIII a finales del siglo XX, pasamos de un universo estático e inmutable, con un tamaño de 100.000 años luz, a un universo nacido hace 14.000 millones de años, con un tamaño de 46.000 millones de años luz (porque se ha expandido a lo largo del tiempo) que contiene cientos de miles de millones de galaxias y cuyas dimensiones están en continuo crecimiento.

En estos últimos treinta años se ha llegado a la conclusión de que esta expansión ha tenido una historia compleja, con fases de inflación, de relativa calma y luego de posterior aceleración. Durante este tiempo el universo ha ido mostrando cada vez más insistentemente un lado «oscuro». Pese a haber captado su inmensidad, hemos comprendido de nuevo que había mucho más de lo que habíamos percibido con nuestros ojos. Al principio era solo una cuestión de masa faltante —es decir, de una notable cantidad de masa que dejaba sentir sus efectos gravitacionales, pero escapaba a observaciones directas—, después emergió también la evidencia de la presencia de una notable cantidad de energía, igualmente «oscura», responsable de la aceleración de la expansión del universo.

En los años treinta del pasado siglo, Fritz Zwicky (1898-1974), estudiando los cúmulos de galaxias, se dio cuenta de que las galaxias individuales se movían dentro de dichos cúmulos con una velocidad que debería haberlos desestabilizado. Las observaciones mostraban, no obstante, aglomeraciones de cientos o miles de galaxias estables en tiempos cosmológicos. Zwicky aplicó entonces el teorema del virial —que relaciona la energía cinética y potencial en un sistema cerrado de

*N* partículas— al cúmulo de Coma y dedujo que para que las galaxias se mantuvieran unidas gravitacionalmente era necesaria una masa aproximadamente cuatrocientas veces mayor de la que se veía (a través de la relación masa-luminosidad). De ese cálculo y de esas observaciones nació el problema de la «materia faltante», o «materia oscura», como la llamó el mismo Zwicky. Tuvo que pasar un gran número de años, decenios, y realizarse otras muchas observaciones para que la comunidad astronómica se convenciera de ello definitivamente.

A este respecto, fueron decisivos los estudios de Vera Rubin (1928-2016) sobre las curvas de rotación de las galaxias en espiral. Rubin medía la variación de la velocidad con la que las estrellas rotaban alrededor del núcleo de su galaxia a medida que se desplazaban desde el centro a la periferia. A través de los datos que iba recabando se volvía cada vez más evidente que había una notable discrepancia entre las velocidades observadas y las previstas por los modelos de rotación diferencial basados en la distribución de la masa de las galaxias. Las zonas periféricas rotaban demasiado deprisa y deberían haberse desintegrado, a menos que las galaxias no estuvieran rodeadas por un enorme —tanto por cantidad como por extensión— halo de «materia oscura». En este caso, las estrellas supuestamente periféricas serían mucho más importantes respecto a la distribución de la materia, y por tanto no estarían todavía en la zona en que se preveía que la velocidad rotacional disminuyera. También en las galaxias, y no solo en los cúmulos de galaxias, faltaba una gran cantidad de materia que explicara la dinámica observada. Era materia que escapaba a las observaciones, y, por lo tanto, materia «oscura».

A lo largo de los años se han ido sumando otras evidencias sobre la existencia de la materia oscura, desde los efectos debidos a la deflexión de la luz proveniente de galaxias distantes, por efecto de las lentes gravitacionales, al estudio de la distribución de las anisotropías en el fondo cósmico de microondas. Actualmente, la investigación de la evidencia experimental de la materia oscura se centra en la física de partículas y subpartículas nucleares a través de diferentes experimentos llevados a cabo en varios laboratorios, tanto en la Tierra como en el espacio. En el pasado, en cambio, se tuvieron en consideración hipótesis más propiamente astronómicas. Cada vez que, a través de nuevas investigaciones, la comunidad científica descubría una clase de objetos más o menos nueva, o bien porque hasta entonces había pasado desapercibida o bien porque no había sido suficientemente valorada, se hacían los cálculos necesarios para saber si podía ser responsable de la materia faltante. Pero ni el hidrógeno neutro en el espacio intergaláctico, ni los agujeros negros supermasivos, ni las enanas negras, ni los planetas extrasolares han

podido suministrar la cantidad de materia necesaria para que cuadren las cuentas. Ni siquiera los neutrinos, una vez que se ha comprobado que poseen una masa no nula.

La búsqueda de la explicación no se ha limitado al intento de encontrar objetos que puedan resolver el problema reconduciendo la masa oscura a masa bariónica, como los MACHO (objetos compactos masivos en el halo) de nuestra galaxia, o nuevas partículas supersimétricas, anunciadoras de una nueva física. La física ha intentado también revisar, de forma insatisfactoria, aquella dinámica newtoniana que parecía haber entrado en crisis por las observaciones y que requería, justamente, más masa de la que había disponible. En estos últimos años, los esfuerzos para resolver el problema de la materia oscura se han centrado en la investigación de partículas subnucleares, neutras y dotadas de masa, pero que interaccionan de forma extremadamente débil con la materia ordinaria. Mientras los astrónomos siguen acumulando evidencias de la presencia de materia oscura y miden con una exactitud cada vez mayor su volumen y su distribución, los físicos realizan experimentos bajo tierra, donde es más sencillo bloquear la radiación no deseada, y en la Estación Espacial Internacional, para tratar de encontrar pruebas de su existencia. De vez en cuando, en la literatura científica aparece un *hint* (una «señal») de que algo que quizá pueda clasificarse como materia oscura puede haber pasado por un detector, pero nunca hemos leído ninguna confirmación o resultado estadísticamente significativos.

Una vez más el universo se ha revelado «mayor» de lo que pensábamos (no tanto en el sentido de su tamaño como en el de su contenido). El paradigma corriente establece que la materia ordinaria —la de la tabla periódica de los elementos, para entendernos, la «visible» en general— corresponde aproximadamente tan solo al 20 por ciento de la materia oscura, que no vemos ni sabemos cómo es. No sabemos si es caliente o fría, ligera o pesada. La hemos localizado alrededor de las galaxias y en los cúmulos de galaxias, pero no hemos encontrado ningún rastro de ella en la Tierra ni en nuestro sistema solar. A cambio, hemos dado rienda suelta a la fantasía y hemos imaginado que puede estar constituida por partículas con propiedades y nombres exóticos como axiones, axinos, neutralinos, WIMP (partículas masivas que interactúan débilmente) e incluso monopolos magnéticos. El tema es realmente complejo.

# 10

## UNO, MUCHOS, DEMASIADOS

Más reciente es la idea de que no existe un único universo, sino muchos, llamados también universos paralelos: el multiverso, inevitablemente mucho más grande que el universo. La teoría del multiverso se encuentra todavía en sus etapas iniciales y con varios problemas conceptuales aún sin resolver. No disponemos de un modelo único y compartido, y probablemente será necesario un conocimiento más profundo tanto de los principios fundamentales de la mecánica cuántica como de la teoría de cuerdas, en sus diferentes versiones, para converger en una única visión (la teoría de cuerdas sustituye las partículas elementales, puntiformes, por cuerdas vibrantes unidimensionales; candidata a la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad general, requeriría de una descripción completa que no analizaremos aquí). Pese a todo, ya hay quien estudia la jerarquía de los multiversos[31].

Nosotros no quisiéramos ser como Shapley en el Gran Debate, incómodo con las dimensiones que se derivaban de las mediciones de Curtis. Pero 10500 universos, o, peor aún, los 101016 de Linde y Vanchurin, por no hablar de la posibilidad de que sean infinitos, son francamente inquietantes. Piensen en una partida de tres en raya en la que, en un tablero de solo nueve casillas, se deben colocar alternativamente fichas de solo dos tipos, blancas o negras, tratando de colocar en fila tres fichas del mismo color, en horizontal, vertical o diagonal. Pues bien, al cabo de un rato todas las posibles partidas habrán sido jugadas e inevitablemente se repetirá alguna de ellas. El número de partidas que se pueden jugar no es tan grande: 9! = 362.880, si se prescinde de las configuraciones simétricas y se continúa hasta rellenar por completo el tablero incluso después de una victoria o un bloqueo. Si, en cambio, reconocemos que dos partidas, simétricas por rotación o reflexión del tablero, son de hecho la misma partida, reduciremos el número de ellas a menos de 30.000. Pocos grados de libertad, dos tipos de fichas y nueve casillas en total, llevan, por tanto, a una variedad limitada de situaciones posibles. Un número

mayor de grados de libertad permite una posibilidad mucho mayor de diferenciación, pero, con el aumento de las réplicas, se llegará inevitablemente a la repetición. Se podrán jugar innumerables partidas de damas, pero también en este juego los partidos posibles son finitos. En esto radica, por tanto, el motivo de nuestra inquietud: si el número de universos es lo bastante grande, entonces se habrán jugado todas las posibles partidas de damas, *backgammon* y ajedrez, y se habrán compuesto todas las posibles sinfonías, escrito todos los libros imaginables y pintado todos los cuadros. No quedaría nada nuevo por hacer. Lógico, porque con demasiados universos a disposición es inevitable que las cosas, incluso las más complejas, se repitan. Aparte de eso, a partir de cierto número se pueden, se deben, repetir los mismos universos. Tegmark calcula que en el primer nivel jerárquico del multiverso los universos empezarían a repetirse a partir de una distancia de 1010118 metros. Dos Muy lejos, dado que nuestro universo tiene un radio de solo $4 \times 1026$ metros, pero en cualquier caso inquietante. Y si además los universos son infinitos…

Quizá esta hipótesis suponga un paso atrás en el conocimiento. El concepto de infinito es difícil de explicar; es imposible entender su profundidad y, menos aún, todas sus implicaciones. A los físicos, por lo general, les gusta muy poco este concepto; todo lo contrario que a los matemáticos, quienes lo manejan con gran soltura e incluso tienen más de una clase de infinitos. A finales del siglo XIX, Georg Cantor (1845-1918) nos explicó que existen infinitos (*sic*) infinitos y que se pueden comparar entre ellos para establecer su jerarquía. Cantor demostró que no son todos iguales y que algunos son «mayores» que otros, creando así el modelo de los números transfinitos.

«Infinito» sigue siendo, en todo caso, un concepto inimaginable que no conseguimos representarnos mentalmente; todo lo contrario al concepto de ilimitado. Es ilimitada, por ejemplo, la superficie de un toro o de una esfera, pese a ser finita y medible. A los físicos no les agradan los infinitos y, cuando se los encuentran, piensan que son indicadores de la imprecisión o del carácter incompleto del modelo examinado, es decir, una señal de alarma. También el matemático David Hilbert (1862-1943) sostenía que el infinito es una abstracción matemática y no tiene ningún significado físico. Y, en efecto, los físicos consiguieron mantener a los infinitos lejos de sus teorías y de su formalismo, desarrollando una física alternativa que los evitaba cada vez que aparecían en los cálculos.

Cuando la física clásica llegó a predecir, a principios del siglo pasado, que un cuerpo negro ideal debería emitir radiación con potencia infinita —la llamada catástrofe de Rayleigh-Jeans o catástrofe ultravioleta—, se comprendió que algo debía ser revisado, conduciendo tal revisión al desarrollo de la física cuántica. La

electrodinámica cuántica (QED) es actualmente la mejor teoría física con la que contamos (Richard Feynman la definió como «la joya de la física»). Es capaz de predecir de forma extremadamente minuciosa muchas cantidades físicas, pero a condición de que se aborden de modo oportuno, con un proceso llamado «renormalización», los infinitos que produce. Sin embargo, muchos físicos no se sentían, ni se sienten, satisfechos con este proceso, convencidos de que una vez más los infinitos indican la necesidad de mejorar la teoría.

Si, por un lado, muchos siguen considerando que los infinitos son incompatibles con el mundo físico, por otro, algunos cosmólogos, a raíz de los desarrollos de la teoría de la inflación cósmica, están considerando seriamente la posibilidad de que exista incluso un número infinito de universos con estructura fractal, es decir, que se repitan, en su forma, a diferentes escalas. De ese modo, resuelven también el llamado problema de la «sintonía fina» de nuestro universo, representado por el principio antrópico (todas las constantes físicas tienen precisamente los valores que nos permiten estar aquí para medirlas). Otros aborrecen el multiverso, o en cualquier caso no lo consideran un modelo viable, sosteniendo que imposibilitaría calcular las probabilidades de diferentes tipos de universos y hacer cualquier previsión sobre el resultado de cualquier experimento. Como dice Alan Guth, uno de los padres de las teorías inflacionistas, «si existe un solo universo, las vacas con dos cabezas son más raras que las vacas con una sola cabeza y se puede calcular la relación entre las dos poblaciones. En un multiverso con un número infinito de universos habrá infinitas vacas con una cabeza e infinitas vacas con dos cabezas. La relación —infinito dividido por infinito— será indeterminada». Adiós, por tanto, a la capacidad de evaluación que califica una teoría como buena y adiós al conocimiento. Este problema se conoce como el problema de la medida y conlleva de nuevo los infinitos.

El tema del multiverso es, por tanto, muy controvertido; sin embargo, no nos debemos arredrar ante las controversias. Estamos acostumbrados a que en determinados campos del saber los entendidos no estén de acuerdo y nos parece natural. Sucede en climatología. Basta pensar en las distintas opiniones existentes acerca de la contribución antrópica al calentamiento global. Sucede en economía, donde no es difícil encontrar escuelas de pensamiento contrapuestas y en desacuerdo sobre qué causas producen qué efectos. Sucede en medicina, lo cual a veces nos perturba, sobre todo si nos afecta personalmente, cuando buscamos, por ejemplo, una terapia o una operación que resuelva un problema importante. Las opiniones contrapuestas no nos asombran porque sabemos que la climatología, la economía y la medicina son, por supuesto, ciencias, pero no

«ciencias exactas», o al menos aún no. En algunos campos las controversias surgen por un conocimiento incompleto, limitado o aproximado de los factores; en otros, por la incapacidad de pronosticar la evolución de sistemas complejos. Pero las contraposiciones, las controversias y los desacuerdos son normales también entre las ciencias llamadas «duras», como la física o la astronomía, y son contraposiciones de fondo que animan el debate científico, a menudo durante mucho tiempo.

Hemos hablado del Gran Debate sobre la naturaleza de las nebulosas y sobre el tamaño del universo. Podemos recordar también la contraposición del modelo del universo de estado estacionario —después convertido en cuasiestacionario por Hoyle, Burbidge y Narlikar para tratar de salvarlo— con el del *big bang*; o la diatriba sobre el valor de la constante de Hubble entre Allan Sandage y Gustav Andreas Tammann, por un lado, y Sidney van den Bergh y Gérard de Vaucouleurs, por otro; y también la interpretación no cosmológica del corrimiento al rojo defendida por Halton Arp y unos pocos científicos más contra el resto del mundo, entre los que se incluía Geoffrey Burbidge, a quien no le gustaba el *big bang*, pero sí ir a contracorriente; o también la de la discretización/periodicidad del corrimiento al rojo propuesta por William G. Tifft, también contra el resto del mundo. Dichas controversias pertenecen al pasado y pueden considerarse resueltas, aunque algunos de sus protagonistas se mantengan firmes, como por ejemplo Tifft; y también probablemente Hoyle, Burbidge y Arp si todavía vivieran.

¿Cómo se han resuelto estas confrontaciones? Casi siempre con la adquisición de evidencias experimentales, datos de laboratorio y observaciones astronómicas, que han cubierto las lagunas a las que habían dado lugar análisis viciados por grandes incertidumbres, fluctuaciones estadísticas y efectos selectivos. Hubble, con el descubrimiento de cefeidas en las nebulosas y con las medidas sistemáticas de sus corrimientos al rojo, contribuyó a establecer, en contra de Shapley, la naturaleza extragaláctica de las nebulosas. El descubrimiento en 1964 de la radiación cósmica de fondo decretó el fin del estado estacionario, que ya mostraba signos de crisis a raíz de los recuentos de las fuentes de radiación. La cosmología de precisión, posible gracias a las mediciones obtenidas con el telescopio Hubble y con los satélites WMAP y Planck, ha resuelto las dudas sobre el valor de la constante de Hubble, y numerosas mediciones espectroscópicas de galaxias y cuásares han permitido una meticulosa y profunda representación astronómica tridimensional de la distribución de la materia bariónica, haciendo que la inmensa mayoría de la comunidad científica esté en condiciones de poder olvidar interpretaciones no cosmológicas del corrimiento al rojo. Datos, experimentos,

observaciones: estos son los instrumentos fundamentales que permiten rechazar una teoría y reforzar otra, resolver una controversia. Después siempre es fácil saber cuál es la solución correcta. Antes de eso, pero también durante ello, ambas argumentaciones contrapuestas tienen puntos fuertes y débiles que presentan escenarios «posibles».

También la física cuenta con debates famosos, como los mantenidos por Einstein y Bohr sobre la naturaleza de la mecánica cuántica (¿se trata de una teoría de variables ocultas o es una teoría completa?). Y más recientemente Stephen Hawking y Leonard Susskind sobre el destino de la información que entra en los agujeros negros, sobre si se pierde o se conserva.

El camino del conocimiento avanza de un modo que a veces parece organizado y otras fruto del azar, pero a menudo también a través de continuas interpretaciones alternativas de los fenómenos que se van descubriendo de forma paulatina. Y la investigación consiste también en encontrar la forma de distinguir entre las alternativas y saber cuál es la más correcta.

La fantasía de los físicos teóricos suele ser inmensa y basta que haya un nuevo dato interesante, aunque no esté confirmado, para que imaginen posibles explicaciones que pueden dar lugar a controversias. De ese modo, puede ocurrir que se escriban decenas de artículos para explicar por qué los neutrinos, en contra de la relatividad general, viajan a una velocidad superior a la de la luz; o para explicar las implicaciones de las huellas que las ondas gravitacionales dejarían en la radiación cósmica de fondo; o, más recientemente, para responder a la «posibilidad» de un nuevo bosón, posterior al de Higgs, que habría sido encontrado a través de los datos obtenidos por el Gran Colisionador de Hadrones, cerca de Ginebra, y que afectaría a la extensión supersimétrica del modelo estándar. Cuando se desmiente un dato —como ha sucedido en estos tres casos, el último de ellos en el verano de 2016—, el problema se resuelve por sí solo y las teorías generadas quedan como testimonio de un ejercicio intelectual, a veces embarazoso, pero siempre interesante. Si, por el contrario, dicho dato se confirma, las teorías con frecuencia contrapuestas se perfeccionan y se consolidan, y se abre la veda a nuevos experimentos u observaciones que permitan saber cuál es el camino correcto a seguir.

Así, el punto clave es la comprobación. Para que una teoría tenga validez científica debe ser comprobable, debe permitir, por tanto, realizar predicciones que puedan ser confirmadas o desmentidas. Es la base del método científico. Esta es la razón de que una buena parte de la comunidad científica sea especialmente crítica con la teoría de cuerdas y aún más con los modelos cosmológicos que contemplan la existencia de muchos universos. Richard Ellis y Joseph Silk han lanzado la alarma respecto a una actitud, que se manifiesta cada vez

con más frecuencia por algunos físicos teóricos, según la cual una teoría suficientemente elegante y capaz de explicar muchos fenómenos no requiere necesariamente comprobaciones experimentales. Ellis y Silk, en un artículo publicado en *Nature*, critican justamente por esto la teoría de cuerdas y la del multiverso. El hecho de que la teoría de cuerdas no sea comprobable «hoy» porque la tecnología actual no lo permite no significa que no pueda llegar a serlo en el futuro. La situación cambia en el caso de los modelos cosmológicos que contemplan la existencia de un número exorbitante o infinito de universos, ya que estos universos «paralelos» no son observables ni siquiera como generalidad. No deberían considerarse «ciencia». Está en juego —sostienen Ellis y Silk— nada menos que el método científico. El debate, muy animado, se halla en curso y en el mismo están involucrados físicos, cosmólogos y filósofos de la ciencia.

# 11

## ¿Y DESPUÉS?

Es natural preguntarse si con la hipótesis del multiverso hemos llegado al final de la búsqueda de la auténtica medida del mundo, ya que no podemos ir más allá sin renunciar al «método» que nos ha permitido llegar hasta aquí. Tal vez. Aunque sería ingenuo pensar que las sorpresas han finalizado. De hecho, no dejamos de recibirlas continuamente, y siempre nos demuestran que continúa habiendo más de lo que pensamos y nos parece. Y no solo en los confines del universo. Recientemente se ha sugerido que nuestro Sistema Solar contiene otro gran planeta, de más de 10 masas terrestres, hasta ahora pasado por alto en nuestras observaciones, que orbita a 35.000 millones de kilómetros del Sol, mucho más allá de la órbita de Neptuno, pero siempre «a las puertas de casa».

¿De dónde ha salido este planeta, provisionalmente bautizado como Planeta Nueve, y por qué no nos hemos dado cuenta hasta ahora de su posible existencia? En realidad, no es nada nuevo el hecho de que el censo de los cuerpos mayores del sistema solar pueda estar incompleto. Cuando los planetas eran nueve (desde 2006 han pasado a ser oficialmente ocho con la reclasificación de Plutón como planeta enano, en lugar de como planeta), se hablaba de manera recurrente del Planeta X (donde X aludía tanto al número 10 como a una incógnita), término introducido por Percival Lowell cuando todavía se buscaba el noveno planeta, es decir, Plutón.

En la década de los ochenta del siglo pasado se formuló la hipótesis de la existencia de una estrella compañera del Sol —una enana roja, o marrón, llamada Némesis— en órbita excéntrica a más de 50.000 unidades astronómicas de distancia, que cada 26 millones de años perturbaba la nube de Oort, proyectando un gran número de cometas hacía el interior del sistema solar. La hipótesis nacía del deseo de explicar una periodicidad —considerada estadísticamente relevante— en las extinciones masivas producidas en la Tierra en los últimos 250 millones de años. Este gran número de cometas habría impactado de forma periódica y devastadora contra nuestro planeta.

Unos años después se sugirió que el Planeta X podría ser un planeta gigante gaseoso, situado en la zona de la nube de Oort, responsable de algunas peculiaridades constatadas en las órbitas de los cometas de periodo largo (aquellos cuyas órbitas tardan miles de años). Para no confundirlo con Némesis, el planeta fue bautizado como Tyche, la hermana menor de Némesis. No obstante, hay que verlo para creerlo, y Némesis y Tyche nunca han sido vistos.

Sin embargo, se han observado algunas peculiaridades en las órbitas de un puñado de cuerpos celestes del cinturón de Kuiper denominados KBO por sus siglas en inglés (*Kuiper belt objects*). Ya se había descubierto que varios KBO mostraban una inesperada semejanza en algunos de sus elementos orbitales (concretamente, los objetos con perihelio mayor que la órbita de Neptuno y semieje mayor superior a 150 unidades astronómicas). Ahondando en el análisis de los movimientos de estos KBO, dos investigadores del Instituto de Tecnología de California (Konstantin Batygin y Michael E. Brown) han descubierto que seis objetos —entre ellos Sedna y 2012 VP113— poseen órbitas elípticas que apuntan en la misma dirección del espacio. Además, dichas órbitas se hallan inclinadas de la misma manera respecto al plano de rotación de los ocho planetas del sistema solar. Habiendo calculado que la probabilidad de que una alineación así es casual e inferior a 1 entre 10.000, se han planteado el problema de comprender su origen. Desde el momento en que la gravedad es lo que determina los movimientos de los cuerpos celestes, la solución debe buscarse en la interacción gravitacional de los KBO con uno o más cuerpos desconocidos presentes en los confines del sistema solar. He aquí el motivo de la sospecha de que un gran cuerpo celeste, en la zona del cinturón de Kuiper, condicione con su presencia gravitacional las órbitas de los seis KBO y, por tanto, el interés en determinar sus propiedades, masa y orbita, para después tratar de descubrirlo.

En cierto modo, el ejercicio no es nuevo. La existencia de Neptuno, como ya hemos visto, se predijo a raíz de la observación y explicación de las perturbaciones en la órbita de Urano. A su vez, las perturbaciones en la órbita de Neptuno llevaron al descubrimiento de Plutón. La historia quizá se repita y se rinda de nuevo homenaje a la mecánica newtoniana. Quizá. La comunidad astronómica, consciente de algunas falsas alarmas pasadas, mantiene por ahora un cierto escepticismo; espera confirmaciones independientes y, sobre todo, la prueba reina: la identificación inequívoca del objeto en cuestión. Para estar seguros de que existe hay que verlo, lo cual no será fácil. Si Planeta Nueve existe realmente, podría verse con los telescopios más potentes que tenemos, pero es necesario saber dónde mirar con buena aproximación, dado que las dimensiones de los campos visuales de nuestros aparatos son reducidas, abarcan desde los pocos minutos de

arco cuadrados de la cámara WFC3 del telescopio espacial Hubble al grado cuadrado de la Hyper Suprime-Cam del telescopio Subaru en los observatorios de Mauna Kea, en Hawái. Por otra parte, a pesar de utilizarse mapas del espectro infrarrojo del cielo a gran escala —la más exhaustiva es la realizada por WISE (*wide-field infrared survey explorer*)—, no se han alcanzado todavía los niveles de sensibilidad necesarios para excluir categóricamente la existencia del nuevo planeta. Para ver un planeta como Saturno a una distancia superior a 10.000 UA, o uno como Júpiter a una distancia superior a 26.000 UA, son necesarias cartografías más completas que las actualmente disponibles.

A falta de un golpe de suerte habrá que esperar la entrada en funcionamiento del Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos, en construcción en Cerro Pachón, en los Andes chilenos, que debería proporcionar datos suficientes para escribir el próximo capítulo de esta historia, que una vez más nos llevaría, si no a ampliar, sí a enriquecer el sistema solar.

Aunque no aumentemos las dimensiones físicas de nuestro universo, sí aumentamos el registro y el conocimiento de sus contenidos. El mundo resulta ser cada vez más grande o más rico de lo que pensábamos.

Hasta ahora más del 99,99 por ciento de la información utilizada para estudiar el universo proviene del análisis de la radiación electromagnética —a principios del siglo pasado la radiación electromagnética, y solo en el espectro visible, constituía el 100 por cien de dicha información—. En el siglo XX se abrieron todas las «ventanas electromagnéticas» para los estudios astronómicos, algunas desde la Tierra, y otras desde el espacio, y se añadieron, como mensajeros celestes, incluso rayos cósmicos y neutrinos. En la segunda década de este nuevo siglo se ha añadido finalmente una nueva e importante fuente de información: las ondas gravitacionales.

La noticia de su detección directa ha causado gran sensación, aunque el acontecimiento se esperaba desde hacía tiempo. Sin quitar importancia a la medición experimental directa, muchos estaban ya convencidos de su existencia, no solo por haber sido predicha por una de las teorías físicas más hermosas y sólidas —la relatividad general de Einstein, ya comprobada en numerosas ocasiones—, sino también porque ya se había obtenido una prueba, indirecta pero enormemente determinante, de la emisión de ondas gravitacionales al observar la velocidad de decadencia del tiempo de la órbita del púlsar binario PSR B1913 + 16.

Sin embargo, una cosa es saber que algo existe y otra es medirlo directamente y utilizarlo para obtener más información. Se ha abierto así una nueva ventana al universo muy prometedora y muy amplia.

Pensemos que las frecuencias en las que se prevén las ondas gravitacionales varían en diversos órdenes de magnitud, desde los kilohercios a los que son sensibles los detectores terrestres, como LIGO, a los milihercios y otras frecuencias potencialmente detectables con interferómetros en el espacio, como el proyectado por LISA (*laser interferometer space antenna*). Es como abarcar desde las ondas de radio de algunos centímetros a los rayos X de algunos kiloelectronvoltios (keV), pasando por las bandas infrarrojas, visibles y ultravioletas. Lo primero que ha entrado por esta ventana ha sido un acontecimiento de por sí excepcional: la coalescencia de dos agujeros negros de 26 y 39 masas solares respectivamente, a una distancia del Sol comprendida entre 230 y 570 Mpc (megapársecs) (entre 750 millones y 1.900 millones de años luz), cuya fusión ha producido un agujero negro de 62 masas solares y la conversión de las tres masas solares restantes en ondas gravitacionales.

En el caso de las ondas gravitacionales, la teoría para explicar lo observado existe desde hace un siglo, completada con las ecuaciones necesarias, y por lo tanto está perfectamente asimilada, con todas sus predicciones estudiadas al detalle. Aparte de eso, el acceso a supercomputadoras cada vez más potentes ha permitido resolver una amplia casuística de hechos a través de oportunas simulaciones de una gran variedad de situaciones. De ese modo, en el campo de la relatividad general ha sido posible simular toda una librería de casos tipo, como, por ejemplo, la coalescencia de los cuerpos celestes, ya sean enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros o combinaciones de los mismos, variando su masa, su distancia, sus órbitas y otros parámetros relevantes que determinan las propiedades de las ondas gravitacionales emitidas. Es lo que han hecho los investigadores de Advanced LIGO, que, una vez registrada una señal fiable y no espuria, la han cotejado con la librería de señales simuladas reconociendo su naturaleza y obteniendo sus parámetros significativos. Por esta nueva ventana entrarán, por consiguiente, hechos esperados, pero también cabe esperar que antes o después algo desconocido e inesperado aparezca en las gráficas. Y eso es lo que todos esperan. El universo de nuevo se hace más grande, tanto por la riqueza de los fenómenos como por los instrumentos de investigación. El futuro sigue anunciándose interesante y lleno de expectativas.

Una vez superadas las columnas de Hércules, no hemos vuelto a detenernos, pero seguimos sin saber bien «dónde» se encuentran los confines, y no hay razón para pensar que nos estemos acercando ni siquiera mínimamente a ellos. En esta aventura, los descubrimos cada vez más lejos y, a cada paso, nos encontramos cada vez más periféricos, marginales e insignificantes. Seguimos teniendo una sola unicidad, que, debiéndose, por otra parte, a nuestras limitaciones para

ver, escuchar y descubrir todo lo que nos rodea, durará probablemente todavía algún tiempo. Hasta que, justamente, encontremos evidencias convincentes de que no estamos solos. Se ensancharán entonces de nuevo nuestros horizontes para incluir otras formas de vida, otras evoluciones, otros puntos de vista sobre nuestro universo. Será una nueva revolución.

# NOTAS

1 Médico y escritor silesio (de la actual Polonia) doctorado en Padua en 1648, más conocido como místico con el nombre de Angelus Silesius.

2 Pier Francesco Ferrari y Stefano Rozzi, «Neuroni specchio, azione e relazione. Il cervello che agisce come fondamenta della mente sociale», *Rivista Sperimentale di Freniatria*, núm. 1/2012, Franco Angeli, Milán, 2012.

3 Alan C. Bowen, «La scienza del cielo nel periodo pretolemaico», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. I.

4 Ludovico Geymonat, «Il pitagorismo preparmenideo», en *Storia del Pensiero Filosofico e Scientifico*, Garzanti, Milán, 1970, vol. I.

5 Alan C. Bowen, *op. cit.*

6 Alan C. Bowen, *op. cit.*

7 Alan C. Bowen, *op. cit.*

8 Alan C. Bowen, *op. cit.*

9 Franco Ferruccio Repellini, *Cosmologie greche*, Loescher, Turín, 1980.

10 Estrabón, *Geografía*, I, I.16.

11 Raoul Manselli, *Il soprannaturale e la religione popolare nel Medioevo*, Studium, Roma, 1986.

12 Juan Filópono, *De opificio mundi*, III, 4.

13 Christian Wildberg, «Filosofia della natura nella tarda antichità», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. IV.

14 Emile Bréhier, *La filosofia del Medioevo*, Einaudi, Turín, 1980.

15 Cfr. John Lanigan, *An ecclesiastic History of Ireland*, Graisderby, Dublín, 1829.

16 Jean-François Oudet y Régis Morelon, «Le origini dell'astronomia arabo-islamica», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. III.

17 Anne Tihon, «Astronomia, astrologia e geografia matematica. L'astronomia matematica a Bisanzio», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. IV.

18 Matti Lainema y Juha Nurminen, *Ultima Thule: Arctic explorations*, Art Print Oy, Helsinki, 2001.

19 Cfr. Gino Loria, *Storia della matematiche dall'alba delle civiltà al tramonto del secolo* XIX, U. Hoepli, Milán, 1950.

20 Jacqueline Hamesse, «La trasmissione del sapere», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. IV.

21 La visión dantesca la propuso Francesco Palla (1954-2016) en diciembre de 2015 en una conferencia que impartió en la Accademia delle Arti del Disegno de Florencia, cuando ya era director del Observatorio Astrofísico de Arcetri. El autor de estas líneas guarda muy buen recuerdo de él.

22 Aludiendo al episodio bíblico en el que Jacob se queda cojo luchando con un ángel (Génesis 32, 25).

23 *www.museogalileo.it.*

24 Alfonso Ingegno, «Immagini e teorie del mondo: Cosmologie», en *Storia della scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 2001, vol. IV.

25 David Jamieson, de la Universidad de Melbourne. Su interpretación es discutible.

26 Una unidad astronómica equivale a unos 150 millones de kilómetros, la distancia media de la Tierra al Sol.

27 *http://voyager.jpl.nasa.gov/*

28 El portal de la NASA (*exoplanetarchive.ipac.caltech.edu*) mantiene un censo actualizado de los planetas extrasolares y de sus propiedades.

29 *www.pnas.org/content/110/48/19273.*

30 B. R. Oppenheimer *et al.*, «Reconnaissance of the HR 8799 exosolar system. I. Near-infrared spectroscopy», *The Astrophysical Journal*, 2013; 768 (1): 24-40.

31 Quien desee adentrarse en esta fascinante reflexión intelectual puede leer «Universos paralelos», de Max Tegmark, en *Investigación y Ciencia* (ed. española de Scientific American) jul. 2003 (322) (*https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/universos-paralelos-355/universos-paralelos-3885*), *Nuestro universo matemático*, del mismo Tegmark (Antoni Bosch, 2015) o *Un solo mondo o infiniti*?, de Aleksandr Vilenkin (Raffaello Cortina, 2007).